



Gabriel Gómez-Azpeitia
Adalberto Tejeda-Martínez
Luis Carlos Herrera-Sosa



PUERTABIERTA
EDITORES

ARQUITECTURA, CONFORT Y CAMBIO CLIMÁTICO

Antecedentes, bases, cálculos
y ejercicios prácticos
con *bioclimarq*²⁰²³

Gabriel Gómez-Azpeitia
Adalberto Tejeda-Martínez
Luis Carlos Herrera-Sosa



PUERTABIERTA
E D I T O R E S

Consejo Veracruzano de Investigación Científica
y Desarrollo Tecnológico (COVEICYDET)

Programa de Estudios de Cambio Climático
de la Universidad Veracruzana (PECCUV)

Descargue el software aquí: [bioclimarq²⁰²³](#)

ARQUITECTURA, CONFORT Y CAMBIO CLIMÁTICO

Antecedentes, bases, cálculos

y ejercicios prácticos con *bioclimarq²⁰²³*

Primera edición, 2023

© **Gabriel Gómez-Azpeitia**

Universidad de Colima, México

Escuela de Arquitectura y Diseño ISTHMUS, Panamá

© **Adalberto Tejeda-Martínez**

Universidad Veracruzana, México

© **Luis Carlos Herrera-Sosa**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

Escuela de Arquitectura y Diseño ISTHMUS, Panamá

D.R © Puertabierta Editores, S. A. de C. V.

Ma. del Refugio Morales No. 583, Col. El Porvenir, Colima, Col.

Para México: www.puertabierta.com.mx

Para España: www.puertabiertaeditores.com

ISBN: 978-607-8865-83-3

Diseño editorial: Ana Martínez Alcaraz

Impreso en México / *Printed in Mexico*

© Todos los Derechos Reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito de los editores.

ÍNDICE

PRIMERA PARTE. ANTECEDENTES Y BASES TEÓRICAS

1. Introducción	7
Referencias	21
2. La atmósfera, el clima y sus variables	27
2.1 La atmósfera	27
2.2 Clima: pasado, presente y futuro	32
2.3 Variables atmosféricas	43
Referencias	64
3. El bioclima	68
3.1. El clima, los seres vivos y la civilización	68
3.2. Bioclimática	70
3.3 Confort térmico	77
3.4. El rol del habitante	127
Referencias	133
4. Hábitat adaptado	141
4.1 Bioclimática aplicada	141
4.2 Clima urbano	204
4.3 Efectos del cambio climático	216
Referencias	222

SEGUNDA PARTE. CÁLCULOS Y EJERCICIOS PRÁCTICOS

CON *bioclimarq*²⁰²³

5. <i>bioclimarq</i>, software de apoyo para el diseño	232
5.1 Descripción del programa	232
5.2 Métodos de cálculo y estimación de datos	246

5. 3 Guía del usuario	274
Referencias	345
Apéndices	350
A.1 Variables, abreviaturas y símbolos utilizados	350
A.2 Siglas de entidades y conceptos citados	356
A.3 Unidades de medición, prefijos y equivalencias	358
A.4 Ecuaciones citadas	361
A.5 Ecuaciones, conversiones y constantes no incluidas en el texto.....	387
Agradecimientos.....	389
Sobre los autores.....	390
Sobre este libro.....	392
About this book.....	392

PRIMERA PARTE
ANTECEDENTES Y BASES TEÓRICAS

1. INTRODUCCIÓN

Como su nombre lo indica, el alcance de este libro comprende tres temas importantes: la arquitectura, el confort térmico y el cambio climático. La disciplina que los articula es la bioclimática, cuyo propósito es la aplicación práctica de conocimientos emanados de la bioclimatología y la termodinámica al diseño y construcción de espacios habitables, privilegiando para ello el uso de medios de climatización a base de energías pasivas, limpias y de bajo impacto, y reservando el uso de energías activas sólo para alguna tarea residual.

Además de divulgar los conocimientos propios de la bioclimática, otro propósito fundamental de este libro es mostrar el gran potencial que tiene el diseño arquitectónico para reducir la huella de carbono del sector de edificios, específicamente en cuanto a la climatización de los espacios habitables, y a la vez que esos espacios se adapten más fácilmente al cambio climático. Para ello, el libro está pensado como apoyo para los arquitectos y diseñadores en sus decisiones de proyecto, a fin de que puedan lograr las mejores condiciones posibles de confort en ambientes específicos, a la vez que incidir en las dos principales tareas para enfrentar el cambio climático: la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la adaptación a este fenómeno.

Así, el libro consta de dos partes en las que se incluyen tanto procedimientos prácticos como sus fundamentos técnicos o científicos, de modo que puede leerse o revisarse siguiendo el orden en que está escrito, o usar la herramienta *bioclimarq* y el resto del libro emplearlo sólo como material de apoyo. Entonces, la segunda parte (*Cálculos y ejercicios prácticos con bioclimarq*²⁰²³) es más útil para

quien domina las bases de la bioclimática, mientras que la primera (*Antecedentes y bases teóricas*) es fundamental para quienes se están iniciando en esta disciplina. Cualquiera que sea el orden en que se revisen los contenidos, los autores esperamos que sean de utilidad para los lectores y que su consulta no resulte abrumadora.

Ahora bien, aunque el término “huella de carbono” se ha popularizado a últimas fechas, merece ser aclarado. Designa al volumen total de GEI emitidos de manera directa o indirecta por parte de un individuo, organización, evento o producto, en este caso por la construcción y operación de edificios. Los GEI presentes en la atmósfera tienen la particularidad de permitir el paso de luz y radiación de onda corta proveniente del Sol, pero son opacos al paso de radiación de onda larga –radiación calorífica– que emite la superficie de la Tierra. Algunos GEI como el vapor de agua (H_2O en fase gaseosa), el ozono (O_3), el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) entre otros, se fueron incorporando a la atmósfera de manera natural por la actividad volcánica o por la evapotranspiración de la masa vegetal del planeta, entre otros fenómenos, pero durante los últimos doscientos años el aumento de su concentración se debe a actividades humanas, especialmente relacionadas con la quema de combustibles fósiles, ampliamente usados para la generación de energía, como quedó demostrado desde el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007).

La historia del descubrimiento, el desarrollo de evidencias y la publicación de alertas sobre los riesgos de un eventual cambio climático como consecuencia del incremento de la huella del carbono no es reciente. Se remonta a la segunda década del siglo XIX, cuando el físico matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier calculó que un planeta del tamaño de la Tierra, situado a nuestra distancia del Sol, debería ser mucho más frío. Intuyó entonces que algo en la atmósfera debía estar actuando como una especie

de manta aislante (Fourier J.-B. , 1824)¹. Esa manta resultó ser el dióxido de carbono y el vapor de agua en la atmósfera que atrapan la radiación infrarroja (calor) emitida por la superficie terrestre y evitan que escape del planeta, según concluyó la científica estadounidense Eunice Foote a partir de experimentos hechos a mediados del siglo XIX (Foote, 1856). A la misma conclusión llegó el físico inglés John Tyndall pocos años después (Tyndall J. , 1861) y (1863), identificando el efecto invernadero natural de la Tierra y advirtiendo que ligeros cambios en la composición atmosférica podrían provocar alteraciones climáticas.

Tras lo publicado por Tyndall, A. H. Phillips (1882) cometió un error colosal al calcular el plazo en que tales alteraciones climáticas podrían originar eventos catastróficos, a partir de la tasa de emisión de gases provenientes de la industria: ¡dieciocho años!, es decir, hacia 1900. Periódicos de la época comentaron el artículo de Phillips como una “curiosidad”, quizás morbosa, o de plano como una burla.² Ante ello, pocos científicos persistieron en ahondar en el tema, entre los que habría que destacar a Svante Arrhenius (1896) y a Thomas Chrowder Chamberlin (1897) cuyos cálculos replantearon el plazo fatal a miles de años. Después, Arrhenius (1908) actualizaría sus cálculos al advertir que la tasa de quema de carbón era significativamente más alta que la que había medido en 1896, por lo que adelantó el horizonte crítico a centurias.

Es importante señalar que ese rápido incremento de CO₂ observado en escasos doce años (1896-1908) aún no incorporaba la

1. El escrito original de Fourier fue publicado nuevamente, con ligeras diferencias, en 1827 (Fourier J.-B. , 1827). A fines del siglo XIX fue publicado nuevamente como parte de sus obras completas (Fourier J. , 1890). Una traducción en inglés está disponible en: <https://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/Fourier1827Trans.pdf>.

2. Tal es el caso del prestigiado New York Times que ironizó la advertencia de Phillips diciendo que: “es probable que se trate de un error de imprenta, ya que, a menos que el consumo de cigarrillos aumente rápidamente de forma inesperada, la atmósfera debería seguir siendo respirable hasta 1910, o incluso 1912. En esta última fecha, toda la humanidad habrá perecido y nada excepto las plantas más resistentes vivirán en la superficie de la tierra.” (The Atmosphere, 1883).

emisión de gases proveniente de vehículos automotores a gasolina, artefactos que no tardarían en generalizarse y apropiarse de la dinámica social y económica del siglo XX. Como fuera, en ese momento el asunto no parecía tener mayor relevancia en la escala temporal humana. Eso tal vez explique por qué la primera mitad del siglo XX transcurrió entre el escepticismo y el desdén, con la notable excepción de Guy Stewart Callendar (1938) quien reiteró las estimaciones de sus antecesores. Así pues, no sería sino hasta los tiempos de la posguerra en que Gilbert Norman Plass (1956) habría de esbozar por primera vez una teoría del cambio climático derivado de la presencia del CO₂ en la atmósfera. Poco después, Charles David Keeling (1960) aportó una herramienta fundamental para mostrar el incremento de la huella de carbono, la famosa “curva Keeling” plasmada en una gráfica cartesiana que correlaciona la concentración de CO₂ y una línea de tiempo (fig. 1.1).

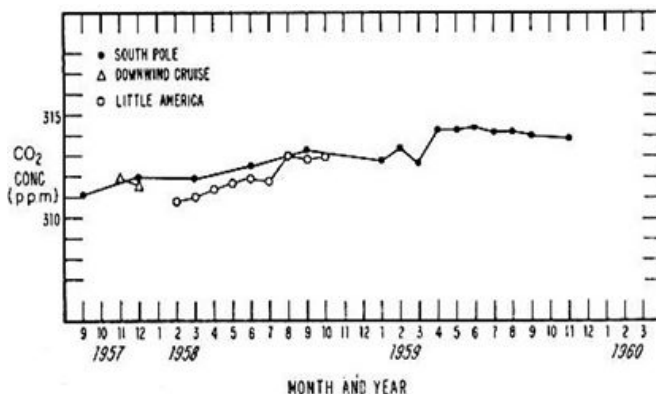


Figura 1.1. Variación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en el hemisferio Sur. Fuente: (Keeling , 1960)

Las primeras *curvas Keeling* publicadas abarcaban sólo dos años (1958-1959, fig. 1.1). Cuando pudieron agregarse los datos de periodos más largos resultó evidente que el incremento en la concentración de CO₂ y otros GEI era bastante pronunciado (Study of Man's Impact on Climate (SMIC), 1971) (fig. 1.2).

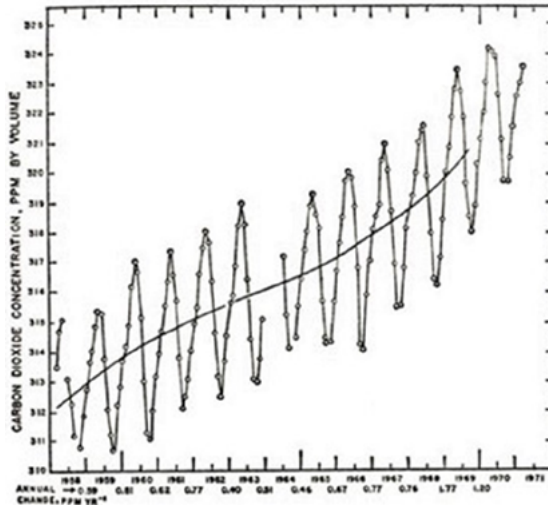


Figura 1.2. *Curva Keeling* de un periodo de trece años (1958-1971) de mediciones tomadas en Mauna Loa, Hawái. Fuente: (Study of Man's Impact on Climate (SMIC), 1971, pág. 234)

Aun así, el escepticismo seguía constituyendo una barrera que frenaba la posibilidad de acciones contundentes para detener la tendencia observada. Se necesitaban más datos, lo más antiguos posible. La respuesta a esa necesidad provino del análisis de núcleos de hielo extraídos de los casquetes polares de Groenlandia y la Antártida, que contienen burbujas de aire atrapado hace miles de años. Los resultados empezaron a publicarse a partir de 1980 (Delmas, Ascencio, & Legrand, 1980) (Werner, Oeschger, & Stauffer, 1980). Pero fue el núcleo extraído del lago Vostok en la Antártida rusa, el que habría de despejar las dudas. El volumen 329 (octubre 1987) de la revista *Nature* incluyó tres artículos sobre tan importante hallazgo. Uno de ellos (Barnola, Raynaud, Korotkevich, & et. al., 1987), demostraba categóricamente el estrecho vínculo entre el CO₂ y la temperatura durante los últimos 160 mil años. La *curva Keelling* que ilustra los resultados de la pesquisa incluyó una novedad trascendental: una curva adicional con datos

de temperatura atmosférica reconstruida a partir de mediciones de deuterio.³ Como lo muestra la figura 1.3, el ajuste entre las curvas de concentración de CO₂ y de temperatura atmosférica es inobjetable.

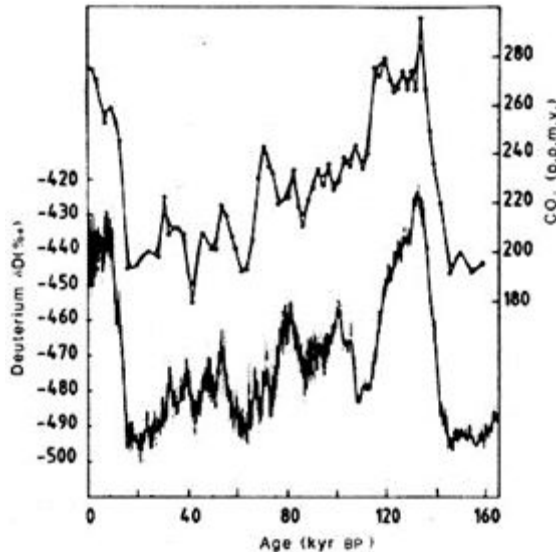


Figura 1.3. *Curva Keeling* con datos extraídos de un núcleo de hielo del lago Vostok, correspondientes a un periodo de 160 mil años. La curva superior corresponde a la concentración de CO₂. La curva inferior corresponde a la temperatura atmosférica. La línea de tiempo transcurre de derecha a izquierda. Fuente: (Barnola, Raynaud, Korotkevich, & et. al., 1987, pág. 410)

Ante estas evidencias, el mundo académico empezó a desterrar su escepticismo y trató de empujar a otros sectores a tomar conciencia. Sin embargo, el tema seguía siendo ajeno para la gran mayoría de la población mundial. Y los grandes intereses económicos y geopolíticos alrededor del petróleo constituyeron una poderosa fuente de rechazo. Entonces dos agencias de la ONU, la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Or-*

3. El deuterio o *hidrógeno pesado* (²H) es un Isótopo estable del hidrógeno con una abundancia en la Tierra de 0.0156 %: uno de cada 6,500 átomos de hidrógeno es deuterio.

ganization, WMO por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), integraron un cuerpo de expertos cuya tarea sería facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Así, en 1988 se formalizó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC por sus siglas en inglés) (IPCC, 2022 b.). De entonces a la fecha y no sin tropiezos, el trabajo del IPCC ha sido intenso, metódico y aleccionador. Sus seis reportes de evaluación publicados hasta 2023 han llegado a conclusiones con un alto nivel de confianza, acerca del origen antropogénico de la huella de carbono y de la inminencia de sus efectos catastróficos (fig. 1.4).

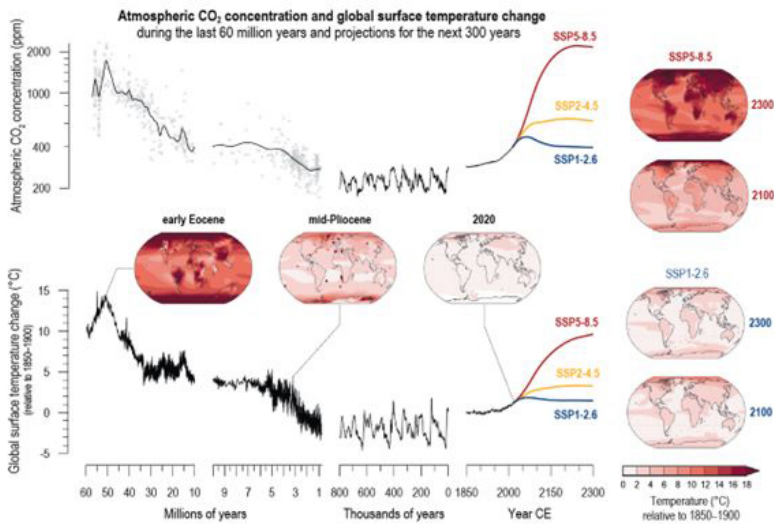


Figura 1.4. *Curva Keeling* elaborada por el IPCC con la concentración atmosférica de CO₂ y el cambio global de la temperatura superficial de la Tierra durante los últimos 60 millones de años y proyecciones para los próximos 300. Fuente: Sexto Informe de Evaluación del Grupo I del IPCC (Bases físicas) AR6-GW1 (Arias, 2021, pág. 44)

El hecho es que, a pesar de las advertencias del IPCC, las emisiones antropogénicas netas⁴ de GEI han seguido aumentando en los principales sectores económicos, incluyendo por supuesto, el sector de edificios. En 2019, las emisiones globales de GEI directas e indirectas⁵ atribuibles a la construcción, renovación y operación de los edificios representaron el 22% del total emitido (fig. 1.5). Esa cifra es mayor entre un 50 % y un 55 % respecto a la del año 1990, debido mayormente al incremento en la superficie construida per cápita, al crecimiento de la población y a un mayor uso de electricidad y calor de alta emisión de GEI para la operación de los edificios. Estos números corresponden a promedios globales pero, desde luego, existen grandes diferencias en las diferentes regiones del planeta (IPCC, 2022 a.).

En este contexto, las opciones de mitigación tendientes a lograr emisiones netas de cero GEI en el sector de edificios pueden ser un factor relevante en el esfuerzo integral para combatir el problema del cambio climático. Fueron planteadas por primera vez en 2007 (IPCC, 2007), y su más reciente actualización aparece en el Sexto Informe de Evaluación del Grupo III (Mitigación) AR6-GWIII (IPCC, 2022 a.) (tabla 1.1).

4. El concepto de emisión neta comprende a todo el proceso involucrado en la generación de GEI así como a su cadena de valor, incluyendo por lo tanto las acciones de compensación que al final dan un balance determinado. El empeño puesto en el Acuerdo de París de 2015, como parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC por sus siglas en inglés), es que se debe alcanzar un balance neutro, es decir, emisiones netas cero de GEI hacia 2050 (UNFCCC, 2022).

5. Las emisiones directas corresponden a la autoproducción de electricidad y calor in situ y al ciclo de vida del cemento y el acero utilizado en la construcción y/o renovación del edificio. Las emisiones indirectas comprenden las generadas por la producción de electricidad y calor de fuentes externas al sitio (IPCC, 2022 a.).

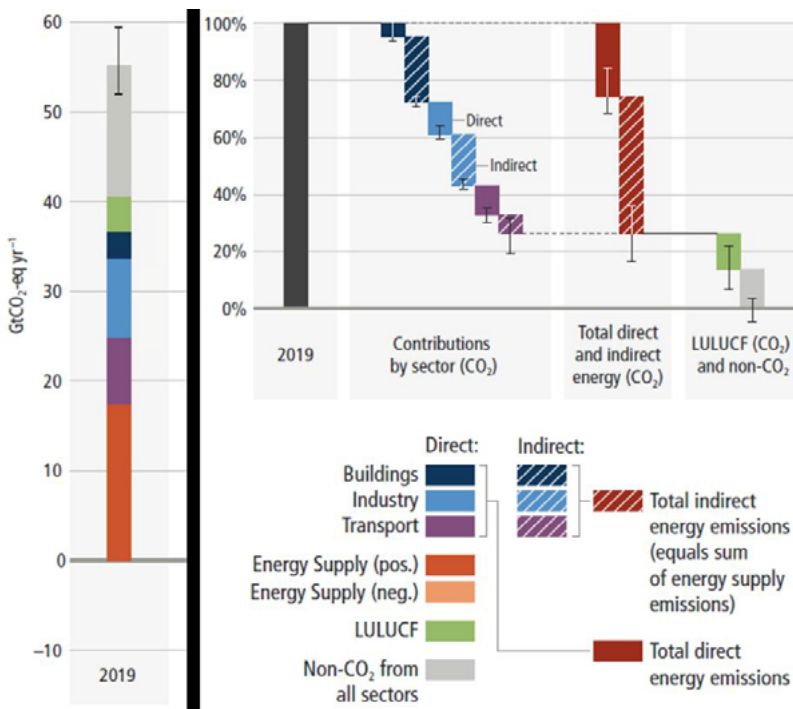


Figura 1.5. Emisión de GEI por sectores económicos en 2019 y posibles vías de mitigación hacia una emisión neta cero de CO₂. Fuente: Adaptado del Sexto Informe de Evaluación del Grupo III del IPCC (Mitigación) AR6-GW3 (IPCC, 2022 a., pág. 31)

De conformidad con los escenarios globales considerados por el IPCC (2022 a.), se proyecta que si se aplican políticas ambiciosas en cuanto a suficiencia, eficiencia y energía renovable, y estas políticas se implementan de manera efectiva, los edificios, tanto los que sean renovados como los de nueva construcción, estarán en posibilidad de contribuir al logro de los objetivos de desarrollo sostenible⁶ hacia 2030 y de mitigar hasta el 61 % de sus emisiones globales en 2050. Las políticas poco ambiciosas, en cambio,

6. Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) integran la nueva agenda de desarrollo sostenible impulsada por la ONU y adoptada por los líderes mundiales en 2015. Su finalidad es erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar prosperidad para todos. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

aumentan el riesgo de retener el carbono de los edificios durante décadas, postergando la meta de neutralidad de emisiones en el sector. Por ello, la década 2020-2030 es fundamental para acelerar el aprendizaje de conocimientos técnicos, desarrollar la capacidad técnica e institucional, establecer las estructuras de gobernanza adecuadas, garantizar el flujo de financiación y desarrollar las habilidades necesarias para aprovechar plenamente el potencial de mitigación de los edificios (IPCC, 2022 a.).

Tabla 1.1. Opciones de mitigación de emisiones de GEI en el sector de edificios.

Fases	Opciones de mitigación
Diseño	Mejoramiento de los edificios existentes con enfoque de eficiencia energética Envoltentes de edificios nuevos y a renovar con elementos de climatización pasiva (p. ej. cubierta verde, cubierta fría, etc.) Ciudades compactas Racionalización del espacio habitable Diseño arquitectónico que gestione la tipología, la forma y la multifuncionalidad de los edificios para permitir el ajuste en cuanto a tamaño, a su adaptación al clima futuro y a las necesidades cambiantes de los habitantes. Planificación de la ciudad que evite la isla de calor urbana (p. ej. con suficientes áreas verdes, etc.)
Construcción	Cambio en los métodos de construcción y economía circular Cambio en los materiales de construcción de baja emisión de GEI, especialmente mediante un mayor uso de productos de madera cultivada sosteniblemente Envoltentes de edificios nuevos y a renovar energéticamente eficientes
Operación	Cambio hacia el uso de energías renovables que eviten la demanda de servicios de energía externos Iluminación, aparatos electrodomésticos y equipos energéticamente eficientes Calefacción, ventilación y aire acondicionado eficientes Producción y uso de energías renovables in situ y en las cercanías Prácticas sociales resultantes en ahorro de energía Cambios en estilo de vida y de comportamiento, especialmente en cuanto a la optimización del uso de los edificios
Eliminación	Reciclaje de edificios sin uso para evitar la ocupación de terrenos adicionales así como la utilización de materiales intensivos en GEI Reutilización y reciclaje de materiales de construcción

Fuente: Adaptado de Sexto Informe de Evaluación (2022) del Grupo III (Mitigación) del IPCC (IPCC, 2022 a., págs. 34-35, 42, 45).

En cuanto a las consecuencias del cambio climático, el propio IPCC (2022 c) afirma, con niveles de confianza muy altos, que este fenómeno ha afectado negativamente la salud física de las personas en todo el mundo –y la salud mental en algunas regiones–, al grado de que los episodios de calor extremo –mismos que se han intensificado en las ciudades, incluidas las olas de calor– han provocado mortalidad y morbilidad humana. A nivel mundial, la exposición de la población a las olas de calor seguirá aumentando con el calentamiento adicional, con fuertes diferencias geográficas en la mortalidad relacionada con el calor sin una adaptación adicional. De ahí que se espere un incremento en las necesidades de energía para climatización de edificios, de no adoptarse medidas y técnicas como las propuestas en este libro. Bajo este último supuesto, se estima que para la segunda mitad de este siglo las zonas urbanas de clima cálido de México deberán incrementar los consumos de energía para climatización de interiores en aproximadamente un 50% con respecto al presente. Pero hay un fenómeno adicional que será descrito en el capítulo 4, la isla urbana de calor, que podría significar un consumo adicional de entre 10 y 20 puntos porcentuales (Tejeda-Martínez et al., 2022). Estas cifras no son privativas de México; para las ciudades costeras del Mediterráneo, por ejemplo, el aumento en climatización artificial de las edificaciones por efectos de la isla urbana de calor representa actualmente entre un 18 y un 28 % (Salvati et al., 2017).

Lo anterior –las necesidades de mitigar emisiones de GEI y de adaptarse al cambio climático global y al urbano– abre a los profesionales de la planeación, proyecto, construcción y operación de edificios, un mercado promisorio en el futuro inmediato, pues sólo las acciones de eficiencia energética contempladas en proyecto y materializadas en la construcción, representan un potencial de abatimiento del 42 % de la emisión neta de GEI del sector edificios para 2050 (IPCC, 2022 a.). Sin embargo, para con-

quitar ese mercado es necesario que tales profesionales tengan a su alcance herramientas que les apoyen en la toma de decisiones de proyecto.

Desde el ámbito académico han surgido herramientas útiles en la formación de arquitectos expertos en el ahorro de energía, el confort térmico de los habitantes y la sostenibilidad de los edificios⁷. Algunas de estas herramientas no constituyen sistemas excesivamente complejos y pueden distribuirse de manera gratuita. Este es el caso de *bioclimarq*, un libro de Excel que le da origen y estructura al presente libro. *bioclimarq*²⁰²³ es una herramienta didáctica y de trabajo desarrollada desde fines del siglo pasado, y resuelta en secciones independientes que fueron articulándose entre sí poco a poco. Empezaron a tomar la forma que hoy tienen hacia fines del primer decenio del XXI, hasta que en 2016 alcanzaron una operatividad aceptable. Como parte de este libro se incluye la versión 2023, ampliada y optimizada, la cual puede descargarse en: [bioclimarq²⁰²³](#)

La herramienta empezó a desarrollarse como apoyo didáctico a los estudiantes del posgrado en Arquitectura Bioclimática de la Universidad de Colima, en México, y desde 2001 de la Escuela de Arquitectura y Diseño ISTHMUS de Panamá. En sus diversas etapas de desarrollo fue usada en varios cursos y diplomados impartidos en universidades y asociaciones gremiales de México, Panamá, Colombia y España. La integración alcanzada en 2016 permitió ampliar los fines didácticos por lo que ahora puede ser usada también por arquitectos, urbanistas y diseñadores en la toma de decisiones basadas en el análisis del clima, las exigencias de ahorro energético y confort térmico y las expectativas de cambio climático, a las que cada uno de sus proyectos se enfrenta.

7. Por ejemplo, e-CLIM: Análisis de clima y confort (Evans, 2004); BAT: Bioclimatic Analysis Tool (Fuentes Freixanet & Rincón Martínez, 2016); y CLIMANALISIS: Análisis climático para diseño de edificaciones (González Cruz, 2019).

La herramienta se divide en tres secciones:

1. *Caracterización climática*; resume las condiciones climáticas anuales y estacionales del sitio en que se pretende erigir el proyecto, con el fin de hacer manejable y entendible la gran cantidad de datos registrados. Esta sección requiere que el usuario introduzca información geográfica y climática básica de cada sitio.
2. *Diagnóstico de confort térmico*, donde las conclusiones de la sección anterior se comparan con diferentes parámetros de confort térmico —como la norma 55 de ANSI/ASHRAE (2021) o las cartas bioclimáticas de Olgyay (Olgyay, 1963), Givoni (Givoni, 1998) y otros—. El producto de esta sección es un resumen de los requerimientos bioclimáticos básicos para el proyecto (enfriar, calentar, humidificar, deshumidificar), así como de las estrategias generales de bioclimatización a seguir, como optimizar la ventilación, incorporar masa térmica a la estructura del edificio, propiciar o bloquear el soleamiento, o incluso disponer de equipos de aire acondicionado o calefacción, entre otras. Este diagnóstico puede efectuarse en términos actuales o para los escenarios de cambio climático proyectados hacia mediados y finales de este siglo. Esta sección requiere que el usuario introduzca información de usos y costumbres de cada sitio, relativos al tipo de vestimenta, rutinas de operación de ventanas y uso de climatización artificial.
3. *Recomendaciones bioclimáticas para el diseño*, en la que se retoman los requerimientos y estrategias de bioclimatización del apartado anterior para determinar tácticas particulares de carácter arquitectónico y/o constructivo con base en los métodos de Mahoney (Koenberger, Mahoney, & Evans, 1971) y de Serra y Coch (Serra Florensa & Coch Roura, 1995), que determinan objetivos de forma general,

proporción, disposición, consistencia y funcionamiento de los elementos arquitectónicos, constructivos y de instalaciones del edificio a proyectar.

Los fundamentos teóricos de estos tres apartados en que se organizan las hojas de cálculo de *bioclimarq*, se desarrollan en el presente libro, cuya estructura sigue la misma línea argumental, resuelta en cinco capítulos:

1. *Introducción*
2. *La atmósfera el clima y sus variables*. Descripción general de la envolvente gaseosa del planeta, el concepto de clima y su evolución, y el manejo de las variables atmosféricas
3. *El bioclima*. Revisión de los efectos del clima en los seres vivos, antecedentes de la biometeorología y la bioclimatología humana, modelos explicativos de la sensación de confort térmico e instrumentos de evaluación bioclimática aplicables al proyecto arquitectónico y urbano.
4. *Hábitat adaptado*. Esbozo histórico de la bioclimática y la climatología urbana, métodos de definición de la forma y la envolvente arquitectónicas, efectos de la urbanización y la edificación en el clima de las ciudades, y escenarios a mediano plazo que debe enfrentar la arquitectura ante un clima cambiante.
5. *Herramientas prácticas*. Una de guía del usuario que detalla los pormenores de *bioclimarq*: instrucciones de llenado, fuentes de información disponibles, calidad que debe reunir la información colectada, fórmulas –y sus fundamentos– empleadas para completar la información no disponible, índices y coeficientes usados en las rutinas de trabajo, tanto propios –desarrollados específicamente para *bioclimarq*– como provenientes de otros ámbitos y autores; algoritmos desarrollados para la evaluación diagnóstica del bioclima, y manera de interpretar las recomendaciones emanadas de la hoja de cálculo.

En conclusión, estamos seguros de que el libro que estamos poniendo a su consideración, tiene aportaciones novedosas porque no se queda sólo en la exposición de los fundamentos científicos del tema, ni en el fomento de una conciencia ambiental para arquitectos. Va más allá, pues ilustra de manera práctica la forma en que profesionales de la arquitectura pueden incorporar en su trabajo los aspectos de ahorro de energía en la climatización de edificios así como las expectativas del cambio climático. Incluye además una herramienta digital que puede ser utilizada por los lectores para determinar las características formales de los edificios en su etapa de prediseño, considerando el clima del sitio, los requerimientos de confort térmico, las opciones de climatización pasiva o activa no contaminante y las demandas provenientes de los climas presentes y futuros, y de esta manera contribuir a la adaptación al cambio climático

Referencias

- ANSI/ASHRAE. (2021). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S.

- Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld (2021). *Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (V. P. Masson-Delmotte, Ed.) Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.002
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237-276. doi:10.1080/14786449608620846
- Arrhenius, S. (1908). *Worlds in the Making*. New York: Harper & Brothers.
- Barnola, J., Raynaud, D., Korotkevich, Y., & et. al. (1987). Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329, 408–414. doi:10.1038/329408a0
- Callendar, G. (1938). The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*(April 1938), 223-240. Obtenido de: https://www.eas.ualberta.ca/jdwilson/EAS372_15/exams/Callendar_QJRMS1938.
- Chamberlin, T. (1897). A Group of Hypotheses Bearing on Climatic Changes. *The Journal of Geology*, 5(7 Oct-Nov 1897), 653-683. doi:10.1086/607921

- Delmas, R., Ascencio, J., & Legrand, M. (1980). Polar ice evidence that atmospheric CO₂ 20,000 yr BP was 50% of present. *Nature*, 284, 155-157. doi:10.1038/284155a0
- Evans, J. (2004). e-Clim. *Análisis de clima y confort*. Buenos Aires, Argentina: CLHE Centro de Investigación Hábitat y Energía, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. Obtenido de: <https://pdfcoffee.com/1-e-clim-clima-fadu-uba-5-pdf-free.html>
- Foote, E. (1856). Circumstances affecting the heat of the sun's rays. *Am. J. Sci. Arts, Serie 2*(Vol 22), 382-383. Obtenido de: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/177958#page/398/mode/1up>
- Fourier, J. (1890). Mémoire sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. En J.-B. Fourier, G. Darboux, & et soins (Edits.), *Oeuvres de Fourier* (Vol. II: Mémoires publiés dans divers recueils, págs. 97-128). París: Gauthier-Villars. Obtenido de https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt_6K9657751j/f127.item
- Fourier, J.-B. (1824). Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, XXVII, págs. 136-167. París.
- Fourier, J.-B. (1827). Mémoire sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Mémoires d'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, VII, 570-604. Obtenido de: <https://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/Fourier1827Trans.pdf>
- Fuentes Freixanet, V., & Rincón Martínez, J. (2016). Bioclimatic Analysis Tool (BAT) Aplicación informática para el análisis bioclimático en arquitectura. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, XII, 27-53. Obtenido de: https://www.academia.edu/33294697/Bioclimatic_Analysis_Tool_BAT_Aplica

ci%C3%B3n_inform%C3%A1tica_para_el_an%C3%A1lisis_bioclim%C3%A1tico_en_Arquitectura

- González Cruz, E. (2019). CLIMANALISIS V1.1. *Análisis climático para diseño de edificaciones. Criterios y estrategias bioclimáticas*. Maracaibo, Venezuela. IFAD Universidad del Zulia.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Geneva: ONU. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf
- IPCC. (2022 a.). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, Edits.) Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926.001
- IPCC. (2022 b.). History of the IPCC. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/about/history/>
- IPCC. (2022 c.). *Summary for Policymakers* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Keeling, C. (1960). The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 12(2), 200-203. doi:10.3402/tellusa.v12i2.9366

- Koenberger, O., Mahoney, C., & Evans, J. (1971). *Climate and House Design*. United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs, Centre for Housing, Building, and Planning.
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Phillips, A. (1882). Pollution of the Atmosphere. *Nature*(27), 127. doi:10.1038/027127c0
- Plass, G. (1956). The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. *Tellus*, 8(2), 140-154. doi:10.3402/tellusa.v8i2.8969
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Obtenido de OurWorldInData.org: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Salvati, A. H. Coch-Roura y C. Cecere (2017). Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study, *Energy and Buildings* 146: 38-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025>
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y Energía Natural*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Study of Man's Impact on Climate (SMIC). (1971). Inadvertent climate modification: report. *Study of Man's Impact on Climate (1970 : Stockholm)* (pág. 308). Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology. Obtenido de: <http://pi.lib.uchicago.edu/1001/cat/bib/214706>
- The Atmosphere. (6 de January de 1883). *New York Times*, pág. 4.
- Tejeda-Martínez, A., I.R. Méndez-Pérez y D.A. Cruz-Pastrana (2022). Domestic electricity consumption in Mexican metropolitan areas under climate change scenarios. *Atmósfera*, 35(3), 449-465. <https://doi.org/10.20937/ATM.52902>
- Tyndall, J. (1861). XXIII. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radia-

- tion, absorption, and conduction.—The bakerian lecture. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 22(146), 169-194. doi:10.1080/14786446108643138
- Tyndall, J. (1863). XXVII. On radiation through the earth's atmosphere. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 25(167), 200-206. doi:10.1080/14786446308643443
- UNFCCC. (2022). *Race to Zero Campaign*. Obtenido de United Nations Climate Change: <https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign>
- Werner, B., Oeschger, H., & Stauffer, B. (1980). Information on the CO₂ Cycle from Ice Core Studies. *Radiocarbon*, 22, 227-235. doi:10.1017/S0033822200009498

2. LA ATMÓSFERA, EL CLIMA Y SUS VARIABLES

2.1 La atmósfera

La atmósfera es la delgada capa de aire que envuelve a un planeta, la Tierra en nuestro caso. Su profundidad no se puede determinar exactamente, pues varía en el espacio y en el tiempo, pero 100 km es un valor práctico y razonable, pues contiene el 99% del aire. El radio del planeta es de aproximadamente 6,400 km, es decir, 64 veces más que la profundidad atmosférica. Comparada la Tierra con una manzana grande, la atmósfera sería apenas la cutícula.

La atmósfera se puede estratificar en capas de espesor y densidad variables. En esencia está compuesta por aire seco, agua (líquida, hielo y vapor) y diversas partículas. El aire seco es una mezcla de gases como nitrógeno, oxígeno, argón, bióxido de carbono (CO_2), hidrógeno, helio, criptón y xenón (tabla 2.1). El nitrógeno y el oxígeno, que suman el 99% de la composición del aire, son gases transparentes que permiten que los rayos del Sol lleguen a la superficie de la Tierra. El vapor de agua también es transparente a la radiación solar, pero al condensarse y convertirse en nubes reflejan hacia abajo –hacia la superficie terrestre– parte de la radiación que a su vez había sido reflejada o emitida por la superficie, y hacia arriba –hacia el espacio exterior– la parte de la radiación solar incidente, además de que en sí el vapor es opaco a la salida de radiación terrestre pues es un gas de efecto invernadero (GEI), responsable en un 60% de que las temperaturas planetarias sean propicias para la vida (para más detalles ver Tejeda-Martínez et al 2018).

Tabla 2.1 Componentes del aire seco limpio

Gas		Concentración (ppm) ⁸
Nitrógeno	N ₂	780.900
Oxígeno	O ₂	209.400
Argón	Ar	9.300
Dióxido de carbono	CO ₂	315
Neón	Ne	18
Helio	He	5.2
Metano	CH ₄	2.3
Criptón	Kr	0.5
Hidrógeno	H	0.5
Xenón	Xe	0.08
Dióxido de nitrógeno	N ₂ O	0.02
Ozono	O ₃	0.01-0.04

Fuente: Tejada-Martínez et al (2018)

Nuestra atmósfera actual deviene de un largo proceso evolutivo, el cual aún continúa, entre otras causas, por la actividad volcánica, pues aunque actualmente es menos frecuente e intensa que hace millones de años, todavía es causa de emisiones de CO₂, vapor de agua, metano, amoníaco, dióxido de azufre, cenizas, etc. La humanidad, por su parte, desde hace casi tres siglos ha estado alterando la composición atmosférica mediante emisiones de gases como el CO₂ y el metano (CH₄), a raíz de la Revolución Industrial, y de medio siglo a la fecha emite de manera intensiva esos compuestos de la invención humana que tienen el nombre genérico de clorofluorocarbonos.

8. ppm es una abreviatura para expresar partes por millón. Para convertir una concentración expresada como ppm a otra expresada como el porcentaje de un total, se debe dividir la concentración de ppm entre 10,000.

La atmósfera primitiva fue generada por un proceso similar al que originó al Sol y a otros cuerpos del Sistema Solar, a partir de una nube de polvo y gases que vagaba en la Vía Láctea. Probablemente contenía nitrógeno, monóxido de carbono, CO_2 , vapor de agua, hidrógeno y gases inertes, como parte de una masa de polvo cósmico y gas. El viento solar pudo haberse llevado la mayor parte de esa atmósfera durante los primeros mil millones de años de la Tierra –de los 4 mil 700 millones de años que tiene de circundar al Sol–. Al irse solidificando el planeta las emanaciones de gases de la parte interna más caliente dieron lugar a la base de la atmósfera actual. Al enfriarse el planeta parte del vapor de agua de la atmósfera se condensó, formó nubes y lluvias y surgieron los océanos. La aparición de vida en los mares y los procesos de fotosíntesis de las primeras plantas aumentaron la concentración de oxígeno en la atmósfera (Budyko et al, 1985; Hartmann, 2016).

Los fenómenos atmosféricos que son del interés de este libro ocurren en los primeros 8 a 18 km de altura (en la capa llamada troposfera), donde se concentra el 75% de la masa de la atmósfera y ocurren el tiempo meteorológico y el clima; más aún, la parte con la que estamos en contacto la mayor parte del tiempo (excluyendo a los viajeros de un avión y a los trabajadores en la profundidad de las minas, por ejemplo) se encuentra en los primeros cientos de metros más cercanos a la superficie.

En un corte vertical de la atmósfera se pueden distinguir capas de acuerdo al comportamiento promedio de la temperatura (figura 2.1). En la troposfera la temperatura desciende con la altura aproximadamente a razón de $6.5\text{ }^\circ\text{C}^9$ por cada kilómetro, pero esa razón de cambio puede variar dependiendo de los movimientos verticales del aire y de la cantidad de humedad en la atmósfera.

9. También se puede decir que son 6.5 K. Cuando se trata de un dato puntual, los grados Celsius o centígrados ($^\circ\text{C}$) se pueden convertir a Kelvin o absolutos (K) mediante la relación $[T(\text{en K}) = T(\text{en }^\circ\text{C}) + 273.15]$; y cuando se trata de un incremento o el tamaño de un intervalo de temperaturas $1^\circ\text{C} = 1\text{ K}$.

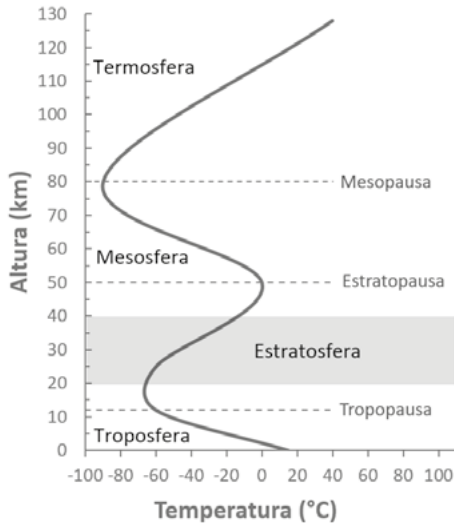


Figura 2.1. Estructura vertical de la atmósfera.

Por encima de la troposfera la temperatura aumenta, primero lentamente hasta una altura de alrededor de 30 km y luego rápidamente hasta los 50 km; es la estratósfera, rica en ozono. Siguen la mesósfera, la termosfera y por último la exósfera (por encima de los 500 km de altura). La estratósfera filtra los rayos ultravioleta y la mesosfera los rayos X, ambos perjudiciales para la vida cuando se reciben

en exceso. En la termosfera la escasa densidad del aire a esas alturas hace que sea muy poco el calor que contiene a pesar de las temperaturas altas, puesto que la temperatura es una medida de la agitación de las moléculas de un cuerpo por efecto de su contenido de calor. De ahí que las temperaturas altas de las capas superiores no signifiquen que su contenido de calor sea tal que queme un objeto que estuviera en contacto con esas capas.

Regresando a la superficie, la importancia de los océanos en las condiciones térmicas del planeta y en especial para algunas regiones, es tal que determina en gran medida las temporadas de lluvias, de los huracanes, de *frío* o de *calor*, etcétera.

Para caracterizar el estado de la atmósfera se hace uso de variables como la presión atmosférica, la temperatura del aire, la humedad (contenido de vapor de agua en la atmósfera), la precipitación de agua (como lluvia, granizo, nieve, etc.), la radiación solar recibida, la nubosidad, la actividad eléctrica atmosférica y el

viento (su dirección y su rapidez), principalmente. Los valores de esas variables correspondientes a periodos de semanas o menores constituyen lo que se llama el **tiempo meteorológico**, mientras que a la síntesis estadística de periodos mayores se le llama **clima**. A estas variables atmosféricas podrían agregarse otras para referirse ampliamente al ambiente atmosférico que rodea al ser humano, tales como la radiación que emiten los objetos del entorno y la calidad del aire.

En ocasiones se puede uno encontrar la expresión “para una atmósfera estándar” o “en condiciones de una atmósfera estándar”. Si bien el concepto es amplio, por el momento es suficiente con saber que una **atmósfera estándar** es aquella que al nivel del mar ejerce una presión de 1013.25 hectopascales (hPa) o milibares, que son lo mismo; tiene una temperatura media de 288.15 K (equivalentes a 15 °C), y una densidad de 1.225 kg/m³. En la sección 2.3 se detallará sobre las unidades de presión y temperatura mencionadas anteriormente.

La atmósfera está en constante movimiento transportando de un sitio a otro o entre las superficies del planeta (continentes u océanos) y la propia atmósfera, energía (calor principalmente), materia (como vapor de agua, polvo, contaminantes, etcétera), y una magnitud física que se llama momento mecánico (el producto de la masa por la velocidad). Esto da origen a las variaciones meteorológicas en cada sitio, pero describirlas no es el propósito de este libro. Baste decir que las condiciones atmosféricas de un sitio en algún momento son moduladas en gran medida por la época del año, la posición geográfica —latitud, altitud y cercanía o lejanía a cuerpos de agua—, la orografía y el paisaje. Esas variaciones ocurren principalmente en la troposfera, pero nos ocuparemos de las que afectan directamente a las inmediaciones de la biósfera, es decir, la zona en que solemos habitar los seres humanos.

Como ya se dijo, a las condiciones de un periodo de varios años (décadas en adelante) se les conoce como *el clima*, y la manera de describirlo en forma cuantitativa y cualitativa —más que sus causas físicas— se mostrará en este libro como una base mínima para el diseño de las edificaciones con enfoque bioclimático. A continuación, se discutirá brevemente la idea de clima, y en el apartado siguiente se hará una enumeración de las principales variables atmosféricas —o elementos del clima, si se refiere a periodos largos— en cuanto a su significado físico, sus instrumentos de medición y sus tratamientos estadísticos básicos.

2.2 Clima: pasado, presente y futuro

El clima se vio por muchos años como algo fijo, igual que una planta o una roca, que tardan milenios en evolucionar. Las primeras aproximaciones a su estudio son taxonómicas y de ahí surgieron las clasificaciones climáticas como por ejemplo la clásica de Köppen adaptada a México por la maestra Enriqueta García (Figura 2.2, García, 2016), que aun siendo útiles en algunas aplicaciones no reflejan la complejidad del sistema climático (figura 2.3), que se compone de la atmósfera, la biósfera, la hidrósfera, la litósfera y la criósfera (glaciares y superficies nevadas), y la forma en que estos elementos comparten y se reparten la energía que llega del Sol, el agua que está en permanente cambio de fase, el momento mecánico, las reacciones químicas y los ciclos biológicos.

El clima de un sitio es una síntesis estadística del tiempo meteorológico. Para los hispanohablantes es fácil diferenciar el clima del tiempo meteorológico: el verbo *ser* para el primero y *estar* para el segundo, aunque a veces la palabra clima se usa inapropiadamente, como cuando los medios de comunicación se refieren al “pronóstico del clima” o el “clima de hoy”, cuando deberían haber usado la palabra *tiempo*, pero sobre esta priva la inconveniencia

de que tiene una connotación meteorológica y una cronológica, por lo que su uso a veces es confuso.



Figura 2.2. Climas de México según la clasificación Köppen-García (García, 2016). Fuente: INEGI. Datos del mapa ráster de climas (1950-2000). Escala de referencia 1:1 000 000. Resolución espacial 250 metros, 2011. Sistema de Clasificación Climática de Köppen (1936), modificado por Enriqueta García (1973) y por el INEGI (1976). INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2020. Tomada de: <https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/tematicos/climas.pdf>

Pero ¿cómo se puede saber si un clima está cambiando o ha cambiado en el pasado? Con datos recabados en las estaciones climatológicas (temperatura y precipitación pluvial principalmente), que en algunos lugares datan a lo más de trescientos años. Para pasados remotos se tiene que recurrir a datos paleoclimáticos, como barrenos de glaciares antiguos (véase el capítulo de introducción) (figura 2.4) o muestras de aguas de mar profundas que estuvieron

en contacto con el aire hace miles de años; suelos vetustos, etcétera, donde quedaron pequeñas muestras de gases y de partículas o polen que darán indicios de las condiciones atmosféricas del pasado, o el grosor de los anillos de los árboles que varían según la disponibilidad de agua en el suelo (Acot, 2003). Para periodos más recientes están los relatos históricos, como las fechas de las vendimias en los conventos con las que se han reconstruido mil años de historia del clima europeo (Le Roy-Ladurie, 1991), o las fechas de las rogativas para pedir al santo patrono que lloviera, lo que permite tener una historia de casi tres siglos de las sequías ibéricas (Martín-Vide, 2003).

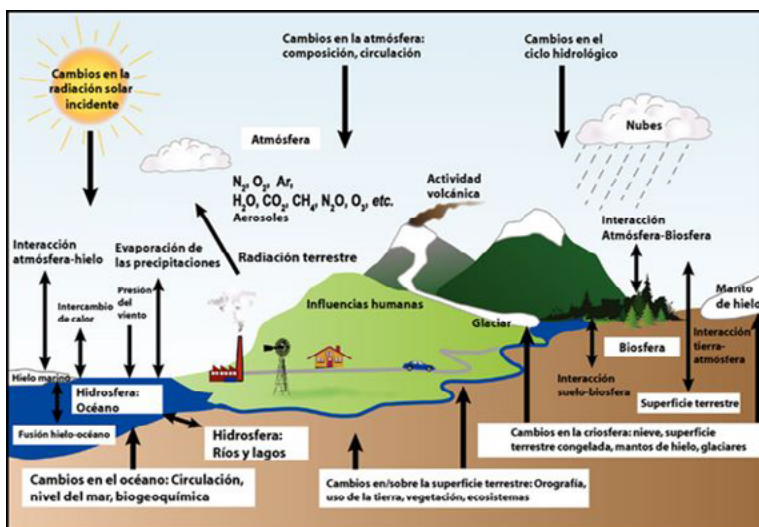


Figura 2.3. Esquema del sistema climático. Tomada de: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-2-figure-1.html

¿Cómo podemos conocer las causas de esos cambios? Varias de las hipótesis de la dinámica del clima se han ido comprobando en el último medio siglo mediante comparaciones de las mediciones de las variables climáticas —temperatura y precipitación, por ejemplo, ya sean directas o de fuentes paleoclimáticas— con los resultados de modelos computacionales. Hasta hace poco esos

modelos se basaban fundamentalmente en la física, pero en la actualidad son físico-químico-biológicos. Son agrupaciones de algoritmos resueltos en computadoras que permiten vislumbrar el pasado del clima a través de aplicarles forzantes o forzamientos, o sea las alteraciones de alguna parte del sistema climático, para establecer las causas de cambios y fluctuaciones: la deriva continental, que debió haber cambiado los climas a lo largo de millones de años; las variaciones de la órbita terrestre, que tiene efectos en los miles de años, al igual que los cambios en la actividad del Sol, los que a su vez pueden tener efectos de décadas; las erupciones volcánicas que opacan la atmósfera y por tanto enfrían en el orden de algunos años; las modificaciones del uso del suelo que altera los balances de energía de la superficie (deforestación y urbanización, principalmente) con efectos en el orden de décadas; los GEI que provocan el calentamiento planetario, o los polvos de la destrucción por una conflagración nuclear que llevaría a un invierno planetario, temido en la segunda mitad del siglo XX en la época de la Guerra Fría (Hartmann, 2016; Toon et al, 2008).



Figura 2.4. Ejemplo de técnicas paleoclimáticas: perforaciones en la capa de hielo de Groenlandia (verano 2005). Tomada de: <http://elblogdeuhogris.blogspot.com/2017/09/quimica-e-indicadores-paleoclimaticos-i.html>

Pero el binomio forzante-respuesta no es simple. Por ejemplo, una glaciación como la de hace quince a dieciocho mil años, no se explica sólo por las variaciones orbitales que generaron un ligero enfriamiento, sino porque éste incrementó la cubierta de hielo y nieve, expansión que ocasionó un mayor blanqueado del planeta que a su vez redujo la absorción de energía solar que llevó a un enfriamiento, y así en una cadena de retroalimentaciones.

El calentamiento global por los gases de efecto invernadero (GEI) presenta su principal síntoma en un incremento de la temperatura promedio de casi un grado centígrado en los últimos doscientos años. Aproximadamente en un 80% del territorio de México (figura 2.5) se corrobora ese calentamiento (Pavía et al, 2009).

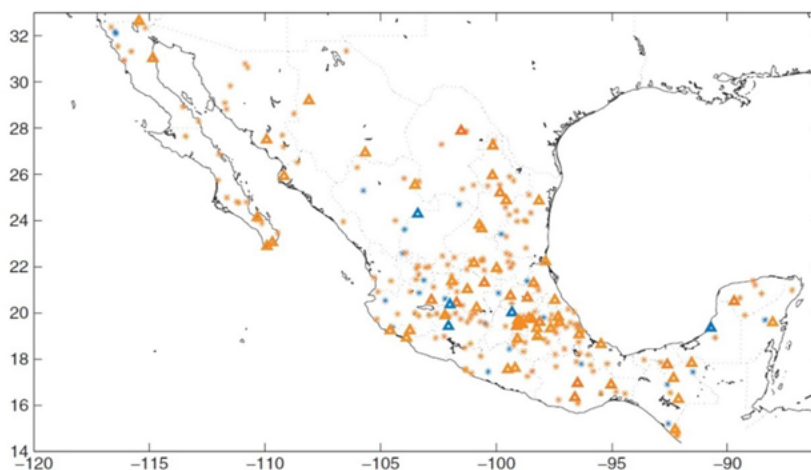


Figura 2.5. Tendencias climáticas para México. Asteriscos y triángulos simbolizan estaciones con tendencias significativas estadísticamente: de color naranja al calentamiento y de azul al enfriamiento; los triángulos significan que las estaciones están dentro de una zona urbana.

Fuente: Pavía et al (2009).

Los GEI son poliatómicos –sus moléculas se componen de tres o más átomos, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de

carbono (CO_2) y el metano (CH_4)– y han estado presentes en la atmósfera terrestre desde hace mucho, pero en tal cantidad que logran una temperatura adecuada para la vida. Venus, planeta vecino en la siguiente órbita en dirección al Sol, tiene una atmósfera en un 90% formada por CO_2 y por tanto su temperatura es de más de $400\text{ }^\circ\text{C}$ (cuatrocientos grados centígrados o Celsius, ambos términos aceptados por la Real Academia de la Lengua); en cambio Marte, también nuestro vecino, pero en una órbita posterior a la nuestra, no tiene atmósfera y su temperatura es de $-50\text{ }^\circ\text{C}$.

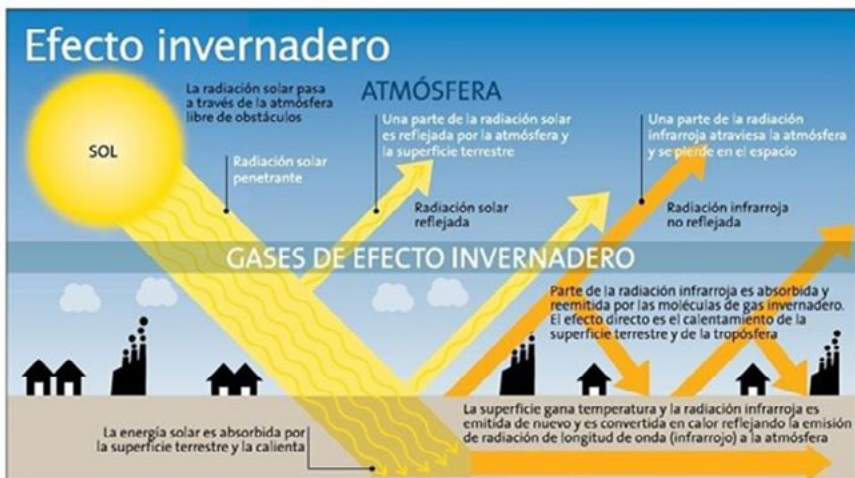


Figura 2.6. Esquema del efecto invernadero. Tomada de: <https://esquema.net/efecto-invernadero-2/>

El efecto invernadero es el hecho de que la radiación que proviene del Sol llega principalmente en forma de luz. La superficie terrestre absorbe una parte de ella y después la emite con otra longitud de onda (y por tanto en otra frecuencia), por lo que tiene otras propiedades tales que esa radiación no puede traspasar los GEI (figura 2.6). El resultado es que el clima tiende a calentarse poco a poco principalmente porque, como ya se dijo, desencadena retroalimentaciones: una pequeña ganancia de radiación por

los GEI origina derretimiento de la capa de hielo y el planeta se vuelve menos blanco y así atrapa más energía, la que genera un calentamiento que derrite más hielo, que opaca al planeta y provoca que retenga más energía, etcétera: lo contrario a lo que pudo haber pasado con la glaciación de hace 18 a 15 mil años.

Por las acciones humanas, a raíz de la Revolución Industrial las concentraciones de GEI, en particular del CO₂, han pasado de 280 a más de 400 partes por millón en volumen (ppmv), con consecuencias notorias en el comportamiento del clima planetario. Las siguientes afirmaciones han sido suscritas en distintos momentos por los científicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013) AR6-GW1 (Arias et al., 2021):

- Se tiene una alta confianza (> 90%) para afirmar que el efecto neto promedio global de las actividades humanas desde 1750 ha sido el calentamiento.
- Es probable (90%) que los ciclones tropicales en el futuro sean más intensos. El aparente incremento en la proporción de tormentas tropicales muy intensas desde 1970 en muchas regiones es mayor que la resultante en las modelaciones.
- La mayor parte del aumento observado en las temperaturas promedio globales desde mediados del siglo XX es muy probable (mayor a 90%) debido al aumento observado en las concentraciones de GEI.
- Para las siguientes dos décadas el calentamiento se proyecta alrededor de 0.2 °C por década para una gama de escenarios de emisiones de GEI. Aunque las concentraciones de todos los gases y aerosoles del efecto invernadero se mantuvieran constantes en los niveles del año 2000, se esperaría un calentamiento cercano a 0.1 °C (o 0.1 K) por década (figura 2.7).

- Dependiendo de las emisiones de GEI para el resto del siglo, y de los modelos usados, por esta causa se espera un calentamiento promedio mundial para finales del siglo en comparación con mediados del siglo XVIII, de 2 a 5 °C (es decir, 2 a 5 K), con consecuencias posibles en incrementos del nivel del mar, intensificación de tormentas, aumento de olas de calor -pero disminución de las de frío-, inundaciones y sequías más severas, actuando sobre una población creciente y cada vez más concentrada en ciudades, muchas veces en zonas altamente vulnerables .

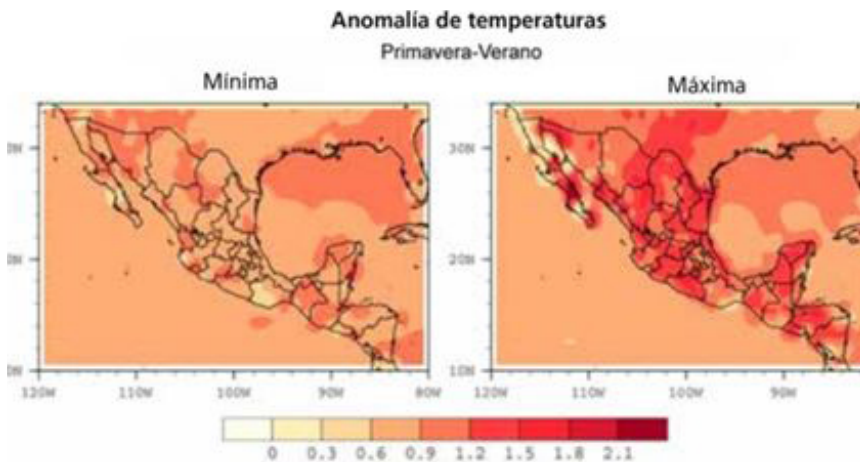


Figura 2.7. Escenario de cambio de temperatura para México durante primavera-verano en el futuro cercano (2015-2039) respecto al periodo 1980-2004. Tomado de *México. Sexta comunicación nacional... ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático* (SEMARNAT-INECC, 2018)

No hay certeza absoluta de lo dicho antes, sino que son afirmaciones rodeadas de incertidumbres, pues se trata de resultados científicos, falibles y modificables, y no de dogmas inamovibles. Con referencia al huracán Katrina, que anegó Nueva Orleans en el año 2005, Pielke Jr. et al (2005) comentaban que atribuir el

impacto excepcional del meteoro al calentamiento global era una irresponsabilidad, pero que negar esa atribución, también.

En el caso de los GEI y su efecto sobre el clima, se trata de algo que el hombre podría contribuir a atenuar: primero, disminuyendo las emisiones, y acompañando las emisiones de medidas de mitigación como reforestación, sustitución de fuentes de energía convencionales por alternativas o disminución del uso de auto-transportes contaminantes. En segundo lugar, es necesario adecuarse al clima presente con una perspectiva de adaptación a los posibles climas futuros más rigurosos que prefiguran los modelos climáticos. Es razonable aplicar un principio precautorio: prepararse para la situación más adversa, y de esa manera asegurarse de sortear las menos catastróficas. En suma, es necesario atenuar el crecimiento de las emisiones de GEI y mejorar las políticas y las acciones para enfrentar las amenazas por hidrometeoros extremos. En ambos sentidos van las edificaciones con menos consumos de energía para satisfacer las condiciones de bienestar de sus ocupantes.

Dicho sea de paso, entre la energía que proviene del Sol, una pequeña cantidad es radiación ultravioleta, dañina para la piel, pero es afortunadamente retenida por el ozono en la estratósfera. Como es sabido, la emisión de clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno generó un agujero en esa capa de ozono que incrementó el paso de esa radiación a la superficie de la Tierra. Pues bien, la buena noticia es que el célebre agujero de ozono se ha venido contrayendo, pero aun si no fuera así y contra lo que piensa mucha gente, el hoyo de ozono no tiene que ver con el efecto invernadero ni con el calentamiento global (figura 2.8).

Por otra parte, el aire en el centro de las ciudades es más cálido entre dos y hasta más de diez grados centígrados respecto a su periferia rural, en la mayoría de los casos debido al cambio de la cubierta vegetal que consumía energía solar para evaporar agua,

por una superficie de pavimento que tiene mucho menos agua que evaporar, y en menor medida por la emisión de energía producto de las actividades humanas (como el calor disipado de los vehículos automotores). Ese fenómeno recibe el nombre de isla urbana de calor (IUC) con distintas intensidades y configuraciones dependiendo de la extensión del área urbana, de la densidad poblacional, así como de la forma de la traza urbana —en general las ciudades estadounidenses, las europeas y las de los países en vías de desarrollo siguen patrones diferentes, identificables más o menos con claridad—. Además, la isla urbana de calor no es permanente, sino básicamente nocturna cuando los cielos están despejados y el aire en calma, y puede presentarse a nivel de suelo, a la altura de los humanos, en las azoteas, por arriba del dosel urbano e incluso en el subsuelo (Oke et al, 2017); cada tipo de ellas tiene un comportamiento diferente (Figura 2.9).

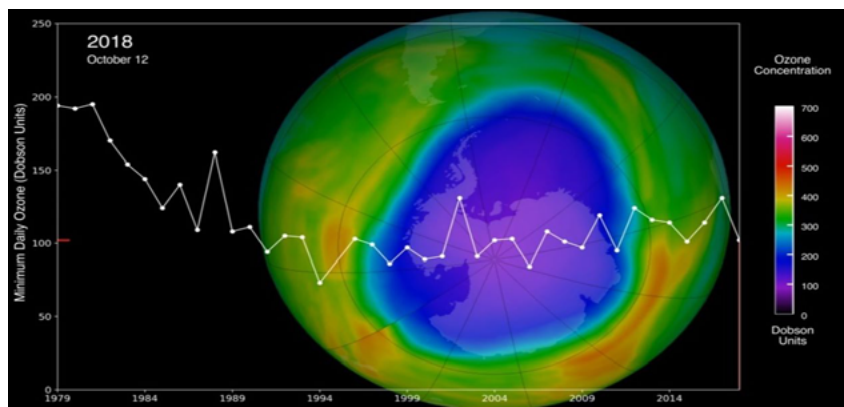


Figura 2.8. Variaciones de la capa de ozono desde 1979.
https://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_record.html.
 Consultada en enero de 2022.

Todas las causas —ubicación geográfica, cercanía o lejanía a cuerpos de agua, incidencia de fenómenos meteorológicos, variaciones de la órbita terrestre y de la actividad solar y gases de invernadero, a nivel global; deforestación y urbanización, a nivel

local— determinan el clima final de algún punto geográfico en particular. Sobre proyecciones futuras y el papel que puede jugar la bioclimática en la mitigación y adaptación al cambio climático, se abundará en el capítulo 4.

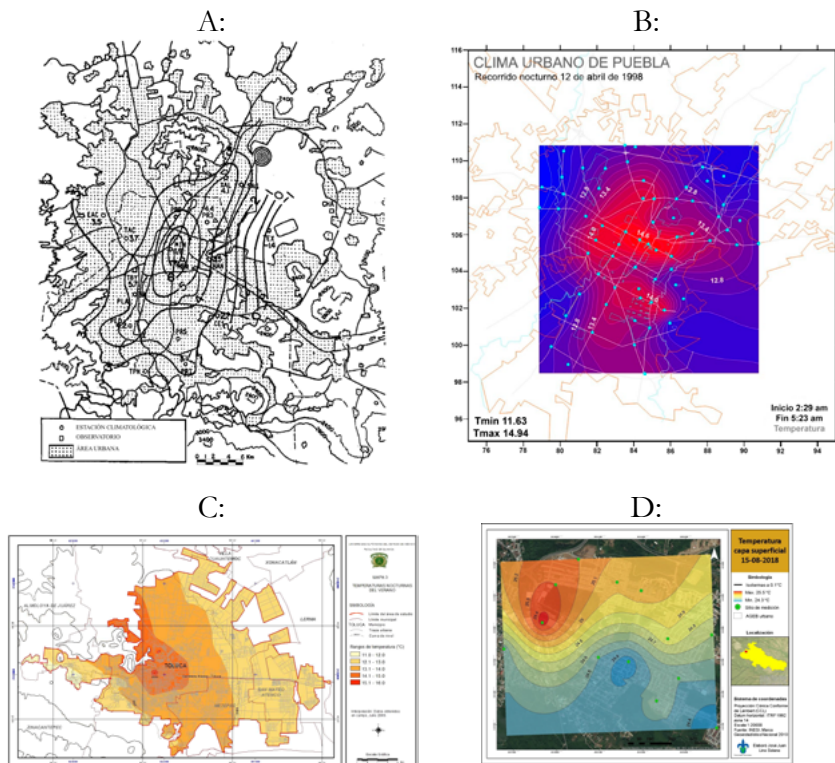


Figura 2.9. Islas urbanas de calor.

- A. Ciudad de México, con 10 millones de habitantes, 13 de enero de 1997 a las 6 am, (Jáuregui, 2000);
- B. Puebla, 1.5 millones, madrugada del 12 de abril de 1998 (Balderas-Romero, 2019, comunicación personal);
- C. Toluca, 400 mil habitantes, madrugada del 29 de julio de 2009 (Romero-Dávila, S., C.C. Morales-Méndez y X. Antonio-Némiga (2011).;
- D. nuevos desarrollos urbanos en Emiliano Zapata, Veracruz, 20 mil habitantes, 15 de agosto de 2018 a media tarde (Lino-Solano, 2019).

2.3 Variables atmosféricas

En este apartado se describirán las variables de la atmósfera de utilidad para este libro, y en la última parte se comentará sobre las fuentes de información climática más asequibles; se incluirá un ejemplo de resumen de información climática de un sitio, y ahí se mostrará cómo los valores anuales se obtienen de distinta manera, dependiendo de que la variable sea acumulativa o intensiva. También se incluirá una tabla con las unidades de medición más comunes y sus equivalencias en otro tipo de unidades, pero antes es necesario distinguir entre varios tipos de variables: vectoriales y escalares; acumulativas e intensivas.

Las **vectoriales** o direccionales, como el viento, están compuestas de dirección o sentido y magnitud, por lo que no es aplicable la forma de promediar comúnmente usada. Por ejemplo, si tenemos un viento de 2 m/s del norte (dirección de 0°) y otro de 4 m/s del sur (dirección de 180°) es absurdo decir que en promedio el viento es de 3 m/s con dirección de 90° (rumbo del este).

Las variables que no son vectoriales las llamaremos **escalares**. A su vez se dividen en **acumulativas o extensivas** (la precipitación pluvial, la radiación solar, la frecuencia de días nublados al mes, por ejemplo), cuyos valores se pueden sumar y obtener un resultado válido. Por ejemplo, si en un mes llueven 40 mm (40 litros/m²) y al siguiente 30 mm, se puede decir que entre ambos meses se acumularon 70 mm, o que en el segundo mes llovió el 75% respecto del primero. No así si los datos fueran de temperatura, o humedad relativa, porque estas son variables **no acumulativas o intensivas**. No tendría sentido decir que si la temperatura máxima de un mes fue de 40 °C y al siguiente de 30 °C entre ambos suman 70 °C, ni que la temperatura del segundo mes fue del 75% de la del primero. Tómese en cuenta que en las variables extensivas las diferencias en porcentajes son invariantes ante el cambio de unidades; por ejemplo, si las precipitaciones se

hubieran dado en pulgadas los respectivos valores serían 15.75 y 11.81, con un valor acumulado de 27.56 pulgadas de lluvia en dos meses, y que el segundo mes precipitó el 75% del primero porque en efecto 11.81 es el 75% de 15.75.

2.3.1. Tiempo¹⁰

En algunos cálculos o la interpretación de ciertos resultados que tienen que ver con la hora del día, es necesario saber si la hora está dada en tiempo civil, tiempo solar medio o tiempo solar verdadero. Los dos últimos pueden discrepar por algunos minutos debido a las diferencias de velocidad en el movimiento de traslación terrestre en distintas épocas del año por las que algunos días son más cortos que otros, cuando la rotación terrestre es ligeramente más rápida. La conocida como **ecuación del tiempo** representa los minutos (y fracción) que deben sumarse o restarse a la hora solar verdadera para obtener la hora del tiempo solar medio. Estas diferencias se explican con la Segunda Ley de Kepler que dice que la Tierra en su recorrido de traslación barre áreas iguales en

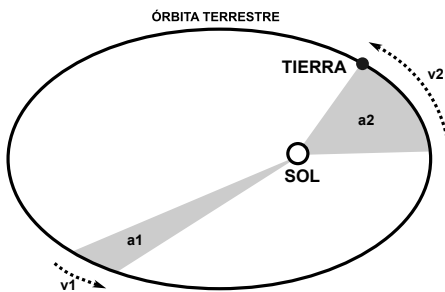


Figura 2.10. Esquema que ilustra la 2ª Ley de Kepler. Las áreas de barrido a_1 y a_2 son iguales. Los tiempos de traslación en ambos casos son los mismos, pero no las velocidades de traslación. .

tiempos iguales. Como la órbita de la Tierra es elíptica y el Sol está en uno de sus focos, el área de barrido depende de la posición orbital del planeta (figura 2.10).

Los valores de la ecuación del tiempo dependen sólo de la fecha, aproximadamente como lo ilustra la figura 2.11. Se pueden obtener de manera precisa de

10. Para más detalles, consultar el *Prontuario solar de México*, www.ucol.mx/publicacionesenlinea

los anuarios astronómicos o mediante ecuaciones más o menos extensas, pero una buena aproximación es la siguiente, con el valor de ET en minutos cronológicos, que difieren de los minutos de arco (ver última sección de este apartado):

$$ET = 9.87 \operatorname{sen}(2f_{ET}) - 7.53 \operatorname{cos}(f_{ET}) - 1.5 \operatorname{sen}(f_{ET}) \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde:

$$f_{ET} = 360 \frac{(n_j - 81)}{364} \quad \text{Ec. 2.2}$$

f_{ET} Factor para la ecuación del tiempo, en grados sexagesimales

n_j Día juliano del año, 1 para el 1 de enero y 365 para el 31 de diciembre.

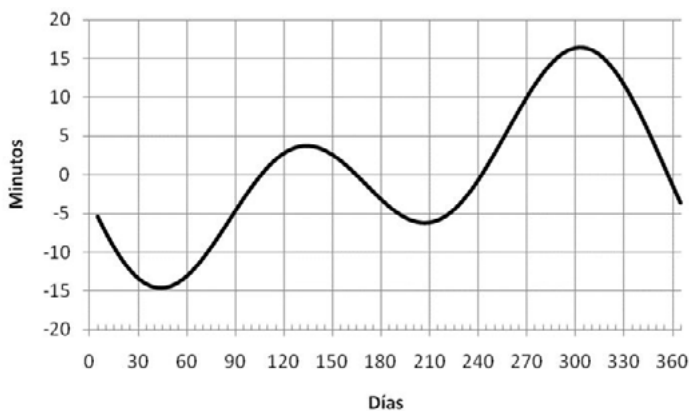


Figura 2.11. Curva que representa los minutos a restar o sumar por efecto de la ecuación del tiempo (ET), conocida como *analema*

La hora que marcan los relojes se ajusta conforme a una convención político-económica. A las regiones con horario unificado se les conoce como husos horarios. La república mexicana tiene 4 husos horarios (figura 2.12): la zona centro se ajusta al horario del meridiano 90°W ; la del Pacífico, al meridiano 105°W ; la noroeste, al horario 120°W , y el estado de Quintana Roo se rige por el de

75°W. Es posible que cuando alguien consulte este libro las convenciones de husos horarios hayan cambiado, por lo que se debe consultar la convención vigente para el sitio de interés. Para pasar de la hora civil a la solar, si el meridiano de referencia a partir del cual se mide la longitud local está al oeste, hay que restar; si está al este, hay que sumar (figura 2.12). En algunos lugares debe hacerse una corrección por el cambio de horario que se practica durante ciertos periodos del año con el fin de aprovechar la luz diurna y ahorrar energía, cambio conocido como *horario de verano*. En México se usó a escala nacional de 1996 a 2022; a partir del 2023 se aplicarán sólo en algunas regiones o ciudades, principalmente en la zona fronteriza con los Estados Unidos .

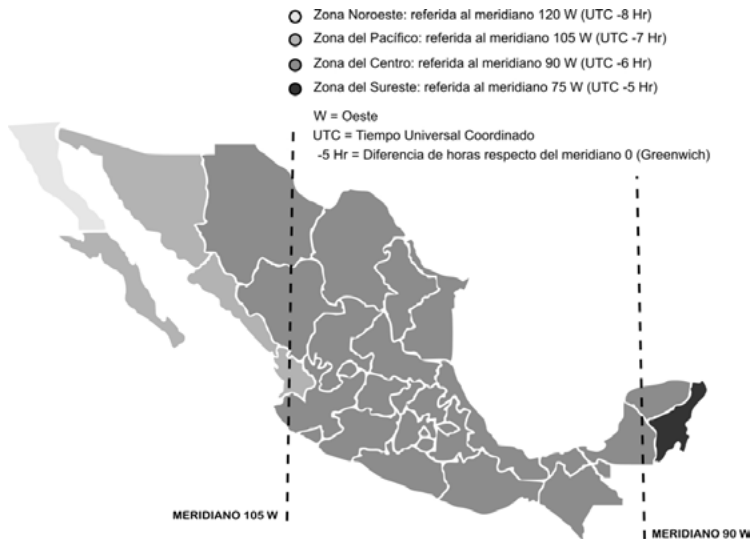


Figura 2.12. Husos horarios de las entidades federativas de la República Mexicana. Nota: Algunos municipios de la franja fronteriza Norte ajustan sus horarios a su contraparte estadounidense vecina. Elaborado con base en la Ley de los Husos Horarios en los Estados Unidos Mexicanos (2022).

Así, la hora solar verdadera y la hora civil de cada sitio se relacionan mediante la expresión:

$$TC = -ET - 4(L' - L) + T_v \quad \text{Ec. 2.3,}$$

donde TC representa los minutos que se deben agregar o restar a la hora solar verdadera, ET es la ecuación del tiempo en minutos, L' la longitud del huso horario de referencia en grados, L la longitud geográfica del sitio, en grados, y T_v indica los minutos a corregir por el cambio de horario; 60 cuando se aplica el horario de verano, 0 si se trata de horario de invierno o si no se practica el cambio de horario.

2.3.2 Presión

La presión es una fuerza ejercida por unidad de área. La atmósfera ejerce presión sobre los objetos o seres que estamos inmersos en ella; es como vivir dentro de un océano de aire. Esa presión atmosférica es máxima al nivel del mar (en promedio 760 mmHg o 1013.25 mb o hPa; para interpretar mejor estas unidades ver la última sección de este apartado), y disminuye con la altura hasta alcanzar el valor de cero donde ya no hay aire. El instrumento para medirla es el barómetro, o bien el barógrafo que grafica al tiempo que mide. Hay barómetros de lectura directa que no guardan datos, hasta los modernos y digitales que almacenan la información. Los primeros barómetros en ser inventados fueron los de mercurio, les siguieron los aneroides a base de cápsulas metálicas al semivacío que cambian su espesor ante cambios de presión, y los digitales ya mencionados que funcionan como los aneroides pero con un transductor en vez de la cápsula metálica.

La presión es una variable que se usa con frecuencia para realizar varios de los cálculos que son motivo de este libro. Los cambios de presión son fundamentales pues de ellos depende el estado del tiempo meteorológico, pero para cálculos de confort higrotérmico basta con usar el dato de la presión promedio de un lugar, pues los cambios entre una situación de *alta* o de *baja* presión no son importantes en dichos cálculos. En algunos casos

no es posible obtener el dato de presión de un sitio, pero se puede tener una buena aproximación si se conoce la elevación sobre el nivel del mar, mediante la expresión válida para México:

$$P = 1008.4 - 0.1020(Z) \quad \text{Ec. 2.4,}$$

donde:

P Presión atmosférica, en hPa

Z Elevación o altitud del sitio, en metros sobre el nivel del mar.

2.3.3 Temperatura¹¹

Muchas veces al hablar de calor y temperatura se confunden los términos. Temperatura es una magnitud que refleja el nivel térmico de un cuerpo, es decir, su capacidad para ceder o perder energía calorífica, o dicho de otra manera, el calor es una forma de energía que, para dos cuerpos en contacto, fluye del que tiene mayor hacia el de menor temperatura.

Para medir temperaturas del ambiente hay en el mercado desde los tradicionales termómetros de alcohol o mercurio en un tubo capilar de vidrio, o de placas bimetálicas —dos metales de coeficientes de dilatación diferentes que ante variaciones de temperatura producen una torcedura de la placa que se transmite a una pluma que grafica sobre un papel graduado—, o los más modernos como los termistores y los termopares, y los de radiación infrarroja que están de moda tanto para medir la temperatura corporal como para usos industriales o en la cocina.

Son de uso común tres escalas termométricas, pero no son las únicas: la escala Celsius o centígrada, que se caracteriza porque el agua se congela a 0 °C y hierve a los 100 °C; la absoluta o Kelvin (la más usada en ciencia), porque nunca alcanza el valor de 0 K

11. Para más detalles, consultar el libro *La humedad en la atmósfera* (Tejeda-Martínez, Méndez Pérez, Rodríguez, & Tejeda Zacarías, 2018) disponible en www.ucol.mx/publicacionesenlinea

(nótese que en la abreviatura de esta escala no se usa el símbolo $^{\circ}$), pues es un valor teórico de temperatura tan baja que las moléculas de la materia estarían inertes; y la Fahrenheit, cuyos 32°F corresponden al punto de congelación y los 212°F a la ebullición del agua. Las relaciones algebraicas para pasar de una a otra de esas tres escalas están incluidas en la tabla del Apéndice 2.

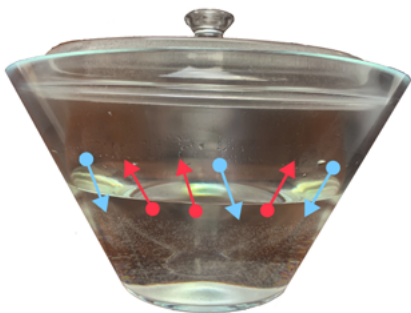


Figura 2.13. Un espejo de agua en contacto con un volumen de aire. Después de cierto tiempo no intercambian calor y la evaporación (flechas rojas) y la condensación (flechas azules) de agua sobre la superficie líquida están también en equilibrio: se ha alcanzado la presión de vapor de saturación.

La temperatura del aire será entonces la medida de la cantidad de calor contenida en él. Pero si una persona o un objeto están expuestos al sol además de intercambiar calor con el aire estarán ganando energía calorífica por los rayos solares que inciden en ellos; además, si hay viento y éste tiene una temperatura menor que la persona u objeto, éstos se estarán enfriando constantemente;

lo contrario ocurrirá si el viento tiene una temperatura mayor que la persona o cosa expuestas a él. Por tales consideraciones, la forma rutinaria de medir la temperatura del aire es mediante un termómetro colocado a la sombra, y con una ventilación mínima.

La temperatura máxima de un día suele ocurrir dos o tres horas después del mediodía, y la mínima alrededor del amanecer, a menos que súbitamente afecte al sitio de interés un sistema meteorológico y le dé al traste a este esquema. Es decir, que entre la temperatura mínima (6 am, por ejemplo) y la máxima (2 pm) la

temperatura aumenta (a lo largo de 8 horas) y disminuye a lo largo de 16 horas, aproximadamente, en sitios de latitudes tropicales.

2.3.4 Humedad¹²

Al contenido de vapor de agua en la atmósfera se le conoce como humedad atmosférica, pero para entender las diversas formas de definirla y calcularla partamos de la Ley de Dalton, que establece que una mezcla de gases ejercerá una presión total que es la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases que componen la mezcla; para nuestros propósitos esa mezcla estará compuesta de aire seco más vapor de agua. Así, el vapor ejerce una presión parcial, que llamaremos simplemente **presión de vapor (e)**, pero cuando en cierto tiempo el aire que está en contacto con un espejo de agua gana tantas moléculas de agua por evaporación como las que pierde por la condensación de esas gotitas sobre el espejo, quiere decir que está en equilibrio o saturado de vapor (figura 2.13), y a esa la llamaremos **presión de vapor de saturación (e_s)**.

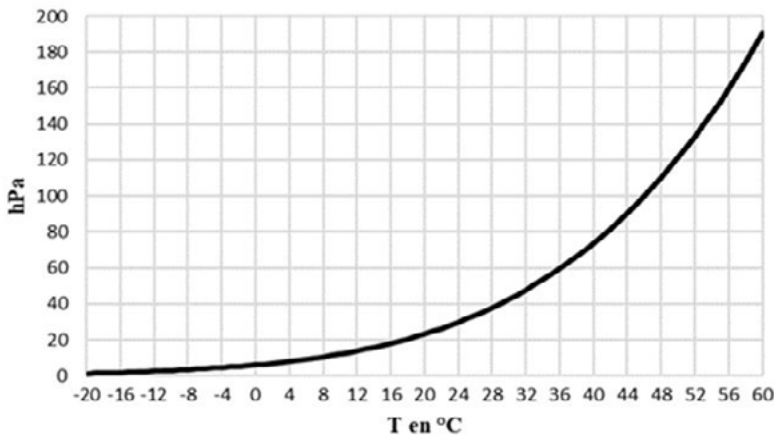


Figura 2.14. Representación gráfica de la ecuación de Clausius-Clapeyron. La presión de vapor de saturación (e_s en hPa) en función de la temperatura (T en $^{\circ}\text{C}$). .

12. Para más detalles, consultar el libro *La humedad en la atmósfera* (Tejeda-Martínez, Méndez Pérez, Rodríguez, & Tejeda Zacarías, 2018) disponible en www.ucol.mx/publicacionesenlinea.

La presión de vapor de saturación depende solamente de la temperatura del aire: a mayor temperatura el aire es capaz de contener más vapor antes de saturarse. La relación gráfica se puede ver en la figura 2.14, y algunos valores en la tabla 2.2, la que además incluye datos para el caso en que el espejo de la figura 2.13 no fuera de agua líquida sino de hielo; como se ve, las diferencias son muy pequeñas.

Tabla 2.2. Presión de vapor de saturación sobre agua y sobre hielo. Presión de vapor de saturación (e_s) en hPa (cuerpo de la tabla) en función a la temperatura (T) en °C. Las decenas en la primera columna y las unidades en la primera fila; en negritas, valores de temperatura sobre hielo.

T	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	73.777	77.802	82.015	86.423	91.034	95.855	100.89	106.16	111.05	117.4
30	42.43	44.927	47.551	50.307	53.2	56.236	59.422	62.762	66.264	69.934
20	23.373	24.861	26.43	28.08	29.831	31.671	33.608	35.549	37.796	40.055
10	12.272	13.119	14.017	14.969	15.977	17.044	18.173	19.367	20.63	21.954
0	6.1078	6.3662	7.0547	7.5753	8.1294	8.7192	9.3465	10.013	10.722	11.474
0	6.1078	5.623	5.173	4.757	4.372	4.015	3.685	3.379	3.097	2.837
	6.1078	5.678	5.2753	4.8981	4.5451	4.2145	3.9061	3.6177	3.3484	3.0971
-10	2.597	2.376	2.172	1.984	1.811	1.652	1.506	1.371	1.248	1.135
	2.8627	2.6443	2.4409	2.2515	2.0755	1.9118	1.7597	1.6186	1.4877	1.3664
-20	1.032	0.937	0.8502	0.7709	0.6985	0.6323	0.572	0.517	0.4669	0.4213
	1.254	1.15	1.0558	0.9649	0.8827	0.807	0.75	0.6727	0.6154	0.5559
-30	0.3798	0.3421	0.3079	0.2769	0.2488	0.2233	0.2002	0.1794	0.1606	0.1436
	0.5085	0.4628	0.4205	0.3818	0.3465	0.3159	0.2842	0.2571	0.2325	0.2097
-40	0.1283	0.1145	0.1021	0.09098	0.08097	0.07198	0.06393	0.05671	0.05026	0.04449
	0.1891	0.1704	0.1554	0.1379	0.1259	0.1111	0.09961	0.08918	0.07975	0.07124
-50	0.03935	0.03476	0.03067	0.02703	0.0238	0.02092	0.01838	0.01612	0.01413	0.01235

Fuente; Byers (1974, p. 158)

Hay varias formas de calcular la presión de vapor de saturación, desde las basadas en la clásica ecuación de Clausius-Clapeyron (ver apéndice A.5), algunas un tanto complicadas, hasta otras re-

lativamente sencillas como las siguientes, que valen para temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, excepto la ecuación 3.13:

Adem (1967):

$$e_s = 6.115 + 0.421915T + 1.4206 \times 10^{(-2)}T^2 + 3.046 \times 10^{(-4)}T^3 + 3.2 \times 10^{(-6)}T^4$$

Ec. 2.5

Steadman (1979):

$$e_s = 6.46 + 0.555T + 7.1 \times 10^{(-4)}T^3 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Tejeda-Martínez (1994):

$$e_s = 6.63 + 0.458T + 4.6 \times 10^{(-3)}T^2 + 6.6 \times 10^{(-4)}T^3 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Lowry y Lowry (1989) (válido sólo para el intervalo $5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$):

$$e_s = 8.51 + 0.037T^2 \quad \text{Ec. 2.8}$$

en todos los casos:

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa

T Temperatura ambiente, en $^{\circ}\text{C}$

En cambio, si se llega a la saturación no por inyección de vapor de agua sino por disminución de la temperatura del aire, a esa temperatura se le llama **temperatura de punto de rocío** (T_d), que se puede estimar con una sencilla ecuación, que depende de la temperatura y de la humedad relativa (HR), aunque no con alta precisión, pero sí la suficiente para los cálculos de este libro:

$$T_d = T - \left(\frac{100}{HR} \right) / 5 \quad \text{Ec. 2.9}$$

donde:

T_d Temperatura de rocío en $^{\circ}\text{C}$

HR Humedad relativa en %

T Temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Nótese que si se sustituye en valor de T_d en vez del de T en la figura 2.14 o en la tabla 2.2 o en las ecuaciones 2.4 a 2.7, en vez de obtener la presión de vapor de saturación se obtendría la simple presión de vapor.

Por su parte, hay varias formas de caracterizar la humedad atmosférica, las cuales se resumen en las siguientes fórmulas de recurrencia:

Déficit de humedad: es la diferencia entre la presión de vapor de saturación e_s y la presión de vapor e presente en algún momento.

Humedad relativa (HR en %):

$$HR = 100 \frac{e}{e_s} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Humedad específica (q , en gramos de vapor por unidad de masa de aire, en este caso g/kg):

$$q = 622 \frac{e}{P} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Razón de mezcla (r_w , en gramos de vapor por unidad de masa de aire seco, g/kg):

$$r_w = 622 \frac{e}{P - e} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Humedad absoluta, también llamada densidad del vapor (ρ_w , gramos de vapor por unidad de volumen, en este caso g/m³):

$$\rho_w = 217 \frac{e}{T} \quad \text{Ec. 2.13}$$

en todos los casos:

- e Presión de vapor en hPa
- e_s Presión de vapor de saturación en hPa
- P Presión del aire en hPa
- T Temperatura en °C

Las relaciones entre distintas variables de humedad anotadas anteriormente se pueden manejar con facilidad en la calculadora de humedad que acompaña al libro de Tejeda et al. (2018)¹³.

La humedad atmosférica se mide con **higrómetros** o con **psicrómetros**. Los primeros miden directamente la humedad relativa y los hay desde muy sencillos hasta modernos y precisos que generan señales digitales. Los segundos funcionan a partir de comparar la temperatura del aire medida con un termómetro seco, y otra con un termómetro mojado, la llamada **temperatura de bulbo húmedo** (T_w) (figura 2.15). La relación entre esas dos medidas y la *HR* se puede observar en la tabla 2.3.

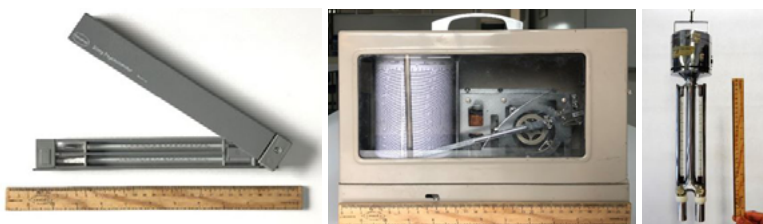


Figura 2.15. Psicrómetros. Izquierda: de honda. Centro: de ventilación natural. Derecha: tipo Assman. Instrumentos facilitados por la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, México.

En ocasiones se requiere conocer el valor de la temperatura de bulbo húmedo y no es fácil, pues de la ecuación del psicrómetro no es posible despejarla, pero una forma sencilla, no tan precisa pero sí lo suficiente, es simplemente obtener el promedio de la temperatura del aire (o ambiente, T) y la de punto de rocío (T_d), es decir:

$$T_w = \frac{(T + T_d)}{2} \quad \text{Ec. 2.14}$$

donde:

T_d Temperatura de rocío en °C

T Temperatura en °C

13. <http://www.ucol.mx/publicacionesenlinea/recursos.php?docto=466>

peratura: la humedad relativa máxima suele ocurrir a la hora del amanecer y la mínima después del mediodía. La tabla mostrada en la figura 2.16 permite la obtención de la humedad relativa (cuerpo de la tabla) a partir de la temperatura de bulbo húmedo (primera columna) y la diferencia de bulbo seco menos bulbo húmedo ($T_w - T$) (primera fila).

2.3.5 Radiación y nubosidad¹⁴

La energía proveniente del Sol es la que alimenta los procesos atmosféricos y oceánicos, y de ahí su importancia. Como viaja en el vacío no lo puede hacer por conducción o convección, sino como radiación electromagnética, en forma de onda a la velocidad de la luz en el vacío (c). La transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas varía según la longitud de onda (que es el inverso de la frecuencia), amplitud y velocidad. La frecuencia y la longitud de onda están inversamente relacionadas en una correspondencia uno a uno:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{Ec. 2.15}$$

donde:

λ Longitud de onda¹⁵

c Velocidad de la luz en el vacío 2.997×10^8 m/s

ν Frecuencia de onda en Hz (ciclos/s)

Los cuerpos emiten, absorben, reflejan o transmite la radiación de acuerdo con las características del propio cuerpo y a la longitud de onda (o la frecuencia) de la radiación. Al cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que a su vez emite toda la radiación que ha absorbido, se le conoce como **cuerpo**

14. Para más detalles, consultar el *Prontuario solar de México*, www.uco.mx/publicacionesenlinea

15. Las unidades de la longitud de onda son las subdivisiones del metro, por ejemplo, micrómetros ($1\mu\text{m} = 10^{(-6)}$ m), nanómetros ($1\text{nm} = 10^{(-9)}$ m), centímetros (cm), etc.

negro. En ese modelo la máxima longitud de onda que emite un cuerpo es inversamente proporcional a la temperatura, de modo que el Sol que tiene en su superficie una temperatura aproximada de 6000 K emite en ondas más cortas que la Tierra, que tiene una temperatura promedio en su superficie de 288 K, aunque el planeta en su conjunto emite como si estuviera a 255 K.

Como la radiación es una forma de energía, sus unidades son las calorías o los Joules, pero es más práctico hablar de la **irradiancia**, que es la energía que fluye, se emite o incide en cierta superficie por unidad de tiempo y de área por lo que su unidad es el $J/(s\ m^2)$, o sea W/m^2 . En cambio la **irradiación** es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona; sus unidades pueden ser J/m^2 o cal/cm^2 (llamado también Langley y se abrevia Ly) o kW-hora/“día”.

En general los instrumentos que miden la radiación son llamados radiómetros, pero adquieren nombres específicos dependiendo del tipo de radiación de que se trate; los tipos más usados en este libro son:

- **Radiación global** es la suma de la radiación directa más la difusa y se mide con el **piranómetro**.
- **Radiación directa** es la parte de la radiación que se recibe directamente del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica; se puede medir con un **pirheliómetro**, pero si se conocen los valores de la global y la difusa la directa se puede calcular por simple diferencia.
- **Radiación difusa** es la parte de la radiación que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica, como la que se recibe a través de las nubes y la que proviene del *cielo*. Si a un piranómetro se le coloca una banda que le dé sombra, se convierte en un **difusómetro**, que es el instrumento con que se mide este tipo de radiación.

- **Radiación terrestre** es la radiación que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que emite una pared, un charco, un lago, etc. El instrumento para medirla es el **pirgeómetro**, que es particularmente sensible a las radiaciones de onda larga.
- **Radiación total** es la suma de la radiación global más la terrestre.

Otra magnitud de interés es el tiempo que incide el sol en un punto de la superficie del planeta. Suponiendo que el sitio está a cielo abierto, el tiempo **de soleamiento**, también llamado **brillo de sol**, **brillo solar** o **insolación** (aunque este es un término en desuso por ser homónimo de una afección a la salud), depende de dos tipos de variables: las dependientes de la geometría solar (la latitud del sitio y la fecha), y las referidas a las condiciones del cielo, como la turbidez del aire y la nubosidad. Cuando se alude a la duración de soleamiento determinado sólo por la variable de geometría solar se le denomina **brillo solar astronómico** (BS_a). Por su parte, cuando se considera también el efecto causado por las variables de turbidez y nubosidad se le denomina **brillo solar efectivo** (BS_e). Salvo en condiciones de altos niveles de contaminación atmosférica, la turbidez no es relevante para los fines de este libro, pero sí lo es la nubosidad.

El tiempo de brillo solar efectivo empezó a medirse aproximadamente desde 1880 con un instrumento llamado **heliógrafo Campbell-Stokes**. Consiste en una lupa esférica que concentra los rayos solares sobre una tira de papel que se va quemando durante el tiempo que los rayos de sol no son opacados por las nubes. Aún hay muchos en el mundo que funcionan regularmente en estaciones y observatorios meteorológicos, pero es un instrumento que tiende a ser sustituido por la interpretación de imágenes provenientes de satélites meteorológicos.

2.3.6 Precipitación pluvial

La forma más común de precipitación pluvial en México es la lluvia, y también la que más se mide. El granizo y la nieve, por ejemplo, no son sencillos de medir y en nuestro país contribuyen poco al total de precipitación. En cambio son fenómenos a tomarse en cuenta si ocurren en el sitio a edificar, pues generan riesgos de daño en las instalaciones y efectos adversos al confort de las personas.

La lluvia se puede medir con instrumentos muy sencillos, como recipientes que colectan la lluvia de un día y cada 24 horas se mide la lámina de agua que se elevó sobre el fondo de dicho recipiente. Los hay más precisos que pueden graficar o almacenar en una memoria digital la cantidad de lluvia en pequeños lapsos, como minutos o incluso segundos. A todos ellos se les conoce como pluviómetros.

Un milímetro de lluvia equivale a un litro en un metro cuadrado¹⁶; entonces si se desea conocer cuánta agua cayó sobre una azotea, por ejemplo, durante una tormenta que precipitó en total 30 mm, bastaría multiplicar 30 por los metros cuadrados de la azotea y se tendría el volumen interceptado.

2.3.7 Viento

El viento es el aire en movimiento. Como ya se dijo, para cuantificarlo son necesarios dos datos, el de la magnitud o rapidez y el de la dirección, por lo que es una cantidad que en geometría elemental se llama vector. La dirección indica de dónde proviene el viento; vale 0 si proviene del rumbo del norte, 90° del este y así sucesivamente (tabla 2.3). En una distribución en 16 rumbos, a cada uno le corresponde un ángulo de 22.5° sexagesimales, que dividen a la circunferencia en 360°. Los grados centesimales son muy poco usados, y con ellos la circunferencia se divide en 400

16. $1 \text{ lt/m}^2 = 1 \text{ dm}^3/\text{m}^2 = (0.1\text{m})^3/\text{m}^2 = 0.001 \text{ m}^3/\text{m}^2 = 0.0001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$

unidades. También están los radianes como unidades de ángulos. Las conversiones de unidades se indican en el Apéndice A.2

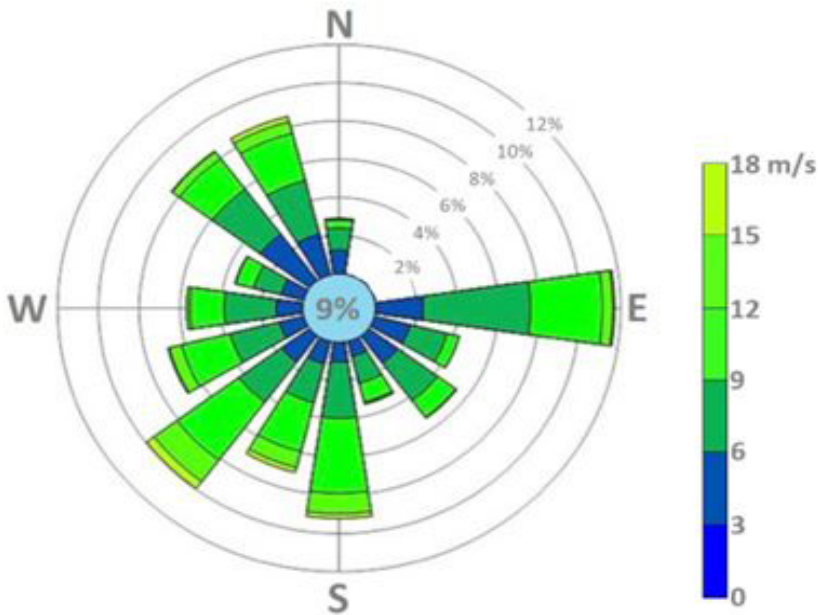
Tabla 2.3. Dieciséis rumbos del viento y sus direcciones en grados sexagesimales

Nombre del rumbo	Abreviatura del rumbo	Dirección (°)	Nombre del rumbo	Abreviatura del rumbo	Dirección (°)
Norte	N	0	Sur	S	180
Nor-noreste	NNE	22.5	Sur-suroeste	SSW	202.5
Noreste	NE	45	Suroeste	SW	225
Este-noreste	ENE	67.5	Oeste-suroeste	WSW	247.5
Este	E	90	Oeste	W	270
Este-sureste	ESE	112.5	Oeste-noroeste	WNW	292.5
Sureste	SE	135	Noroeste	NW	315
Sur-sureste	SSE	157.5	Nor-noroeste	NNW	337.5

A la magnitud debería llamársele rapidez, pues el término velocidad implica tanto magnitud como sentido, pero velocidad es muy usado, al igual que intensidad o incluso fuerza del viento. La rapidez, entonces, tiene unidades de distancia sobre tiempo. Para algunas aplicaciones sólo se requiere este dato, sin el de dirección y entonces en el tratamiento estadístico se omite la consideración de que el viento es un vector. Por ejemplo, en un intervalo de tiempo al rumbo que más se presenta (la moda, en términos estadísticos) se le conoce como **viento dominante**, y para definirlo se hace mención de la dirección y del promedio simple de la rapidez, pues al tratarse de sólo una dirección no hace falta tratar los datos como vectores. El viento de mayor intensidad es el **viento máximo**, y cuando la velocidad es igual o inferior a 0.2 m/s se dice que hay **calma** (WMO, 2021).

La rosa de la figura 2.17 es la representación gráfica de un conjunto de datos de viento. En este ejemplo, el viento dominante es del E (ver la tabla 2.4 para seguir las abreviaturas), pues su frecuencia (12%) es superior a la de los otros rumbos, pero los vientos máximos, que rebasan los 15 m/s, han ocurrido en varios

rumbos: S, SSW, SW y NNW; y se presentó viento en calma el 9% de las veces, lo cual se indica en el círculo central.



Si se tienen varios datos de viento (rapidez y dirección) y se desea obtener su promedio, se procede promediando la dirección este-oeste (normalmente asociada al eje X del sistema cartesiano en el plano) y el promedio de la componente norte-sur (eje Y) y al final se obtiene el vector resultante. Para más detalles se sugiere ver el manual de Tejeda y Cervantes (1994).

El instrumento que mide la rapidez del viento es el **anemómetro** y la dirección se mide con la **veleta**, o cuando están integrados en un solo instrumento de manera genérica se les llama **anemómetros**. Los hay de simple observación instantánea y los más usados actualmente que registran el viento en unidades de memoria digital en los intervalos que le interesen al usuario.

2.3.8 Fuentes de datos y conversiones de unidades

El usuario debe conocer mínimamente sobre el emplazamiento de los instrumentos que generaron los datos climáticos. Desde los inicios de la meteorología, la presión se ha medido por conveniencia a la altura de la vista de los observadores, normalmente al interior de una edificación, a no más de dos pisos sobre el suelo, en un lugar cuya temperatura se aproxime a la del ambiente. La temperatura y la humedad se miden por lo general dentro de un abrigo meteorológico que busca evitar la incidencia directa del viento y de los rayos solares sobre los instrumentos, por lo que el abrigo consiste en una caseta o garita de madera blanca, con paredes en forma de persiana entreabierta, a metro y medio sobre una superficie cubierta de césped, pero no es una regla absoluta, pues en climatología urbana, por ejemplo, se mide en función del interés del estudio. Los termómetros, higrómetros y barómetros electrónicos modernos tienen un abrigo de material plástico que simula las antiguas garitas, que cuando son parte de una misma estación suelen compartir entre los tres sensores. La radiación solar debe medirse, sin importar mucho la altura, en un sitio libre de obstáculos como árboles, edificios o incluso lomas o cerros cercanos, y lo mismo ocurre con la precipitación y el viento, aunque para que este sea representativo de las condiciones del lugar al nivel del hábitat humano, es recomendable –pero no obligatorio– que se mida a 10 m de altura sobre el nivel de la superficie del suelo y en terreno abierto (WMO, 2021). Debe considerarse que el viento es la variable más cambiante en el espacio, pues entre una calle y otra puede diferir en dirección y en magnitud de manera considerable.

En México la fuente oficial de datos climáticos es el Servicio Meteorológico Nacional (<https://smn.conagua.gob.mx/es/>), pero hay un sinnúmero de sitios Web que proporcionan información, algunos de acceso libre y otros mediante pago. Con el fin de que

el usuario conozca el grado de confianza y las limitaciones de esa información, es importante que la fuente especifique si sus datos fueron medidos o estimados, y que estipule los controles de calidad aplicados a esos datos, en el entendido que los datos medidos ofrecen mayor certidumbre.

NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
COLIMA, COL.													
LATITUD N 19° 14' 32"											OBSERVATORIO SINOPTICO		
LONGITUD W 103° 43' 13"											DEPENDENCIA: SMN-CNA		
ALTITUD 444 msnm											PERIODO 1901-2000		
PARAMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA													
MAXIMA EXTREMA	39.5	37.8	39.5	41.0	41.0	40.0	40.0	38.6	37.8	38.0	40.4	41.9	41.9
PROMEDIO DE MAXIMA	33.1	33.8	33.5	35.4	35.9	35.2	33.9	33.4	32.5	33.0	33.3	32.8	33.8
MEDIA	23.3	23.8	24.0	25.7	26.9	27.8	27.0	26.6	26.2	25.9	25.1	23.8	25.5
PROMEDIO DE MINIMA	13.5	13.9	14.5	15.9	18.0	20.4	20.1	19.8	19.8	18.7	17.0	14.8	17.2
MINIMA EXTREMA	11.1	11.0	14.9	13.0	2.5	12.4	17.5	15.2	12.5	10.8	10.5	9.0	2.5
OSCILACION	19.6	19.9	19.0	19.5	17.9	14.7	13.8	13.7	12.7	14.4	16.4	18.0	16.6
TOTAL HORAS INSOLACION	194	158	155	152	161	158	158	181	152	173	199	197	2032
HUMEDAD													
TEMPERATURA BULBO HUMEDO	19.1	19.5	20.2	21.7	23.5	23.6	23.8	23.6	23.1	21.4	19.9	17.6	21.4
HUMEDAD RELATIVA MEDIA	66	53	51	50	51	59	66	64	69	65	57	52	58
EVAPORACION	238	242	252	255	204	150	175	167	130	203	208	209	2431.4
PRECIPITACION													
TOTAL	12.5	18.9	2.1	4.8	7.5	166.0	243.0	215.7	216.9	106.0	15.7	5.4	1014.4
MAXIMA	88.0	161.7	26.0	81.9	82.8	282.4	597.8	315.5	455.4	392.4	85.3	41.0	597.8
MAXIMA EN 24 HRS.	80.9	80.9	17.0	81.9	42.8	75.3	149.8	116.0	165.4	105.5	42.5	23.2	165.4
MAXIMA EN 1 HORA	3.0	3.6	9.8	0.1	12.8	39.0	67.5	80.0	38.7	34.3	30.6	10.0	80.0
PRESION													
MEDIA EN LA ESTACION	923.4	959.3	919.1	958.7	915.7	959.8	925.1	923.7	959.3	914.8	960.5	876.0	933.0
VIENTO													
VELOCIDAD MEDIA	6.6	7.2	8.3	6.8	6.1	6.2	5.5	6.0	6.3	8.8	6.1	8.0	6.8
FENOMENOS ESPECIALES													
LLUVIA APRECIABLE	0.4	0.5	0.5	0.1	0.9	11.0	16.3	18.8	15.8	7.1	1.3	0.7	73.1
DESPEJADOS	12.5	10.3	10.1	10.3	5.9	1.6	1.8	2.1	0.8	5.3	7.8	9.0	77.5
MEDIO NUBLADOS	15.3	14.8	17.3	17.2	11.7	8.2	10.1	10.2	7.8	12.2	15.1	15.4	155.2
NUBLADO/CERRADO	3.2	2.9	3.6	2.5	13.5	20.1	19.2	18.7	21.5	13.5	7.1	6.7	132.4
GRANIZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
HELADA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TORRENTA ELECTRICA	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.5	1.3	1.5	1.0	0.0	0.0	6.6
NIEBLA	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.4	0.2	0.6	0.2	0.3	0.1	0.2	2.4

UNIDADES: TEMPERATURA (°C), HUMEDAD RELATIVA (%), PRECIPITACION Y EVAPORACION (mm), PRESION (mb), VIENTO (ms) Y FENOMENOS ESPECIALES (dias).

Figura 2.18. Ejemplo de una tabla de normales climatológicas.

Fuente: SMN (2021)

Una forma de resumen de información útil para los cálculos de este libro, son las llamadas **normales climatológicas**, que consisten en estadísticas, preferentemente de 30 años o cuando menos de diez, como las mostradas en la tabla reproducida en la figura 2.18. Nótese que, en la columna de valores anuales, está el valor extremo para temperaturas extremas (máxima y mínima), el promedio para las medias mensuales de máxima, mínima y media, así como para la humedad relativa, la presión o la temperatura de

punto de rocío. En cambio, para la precipitación, evaporación, frecuencias de fenómenos especiales, en la columna anual aparecen las sumas de los valores mensuales (que a su vez son las sumas de los valores diarios) porque se trata de variables acumulativas.

Otra forma de hacerse de datos representativos de un sitio es recurrir al **año típico**. Se trata de un año que no haya sido particularmente seco o particularmente lluvioso, particularmente cálido o frío, cuya información sería suficiente para los cálculos aquí requeridos. Dicho en términos estadísticos, las normales climatológicas se construyen a partir de los promedios y los valores extremos de un periodo, mientras que el año típico debería representar a la moda estadística de una muestra de una o más décadas.

Las unidades de medición más comunes de las variables atmosféricas antes descritas se enlistan en el Apéndice A.3 de este libro.

Referencias

- Adem, J. (1967). Parametrization of atmospheric humidity using cloudiness and temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 95: 83-88 Falta título del artículo
- Acot, P. (2003). *Historia del clima, desde el Big Bang a las catástrofes climáticas*. Editorial El Ateneo, Buenos Aires, 268 p.
- Arias, P. A., N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P. W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R. P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J. G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W. D. Collins, S. L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F. J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F. J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J. S. Fuglestedt, J. C. Fyfe, N. P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J. M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H. T. Hewitt, P. Hope, A. S.

- Islam, C. Jones, D. S. Kaufman, R. E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kos-
sin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T. K. Maycock,
M. Meinshausen, S.-K. Min, P. M. S. Monteiro, T. Ngo-Duc,
F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A. C.
Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B. H. Samset, S. Sathyendranath, S.
I. Seneviratne, A. A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M.
Treguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann,
S. Zaehle, X. Zhang, K. Zickfeld, (2021). Technical Summary.
In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of
Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovern-
mental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai,
A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen,
L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy,
J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.
Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Balderas-Romero, 2019, comunicación personal.
- Budyko, M. I., A. B. Ronov y A. L. Yanshin (1985). *History of the
Earth's Atmosphere*. Springer-Verlag, Nueva York, 139 p.
- Byers, H.R. (1974). *General Meteorology*. Chicago University Press.
540 p.
- García, E. (2016). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de
Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*.
Serie Libros No. 6, Instituto de Geografía de la UNAM, 16ª
Edición, 90 p.
- Hartmann, D.I. (2016). *Global physical climatology*. Academic Press
Inc, 2ª edición, Nueva York, 485 p.
- IPCC (2013). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The
Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth
Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
[Compiladores: T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.
Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley

- (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. www.ipcc.ch
- Jáuregui-Ostos, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Plaza y Valdés Editores, México. 131 p.
- Le Roy Ladurie, E. (1991). *La historia del clima desde el año mil*. Fondo de Cultura Económica, México. 522 p.
- Lino-Solano, J.J. (2019). *Detección y caracterización espacial de la isla urbana de calor en la zona periferia de la ciudad de Xalapa en el municipio de Emiliano Zapata, Veracruz*. Tesis de Licenciatura en Geografía de la Universidad Veracruzana, Xalapa, 73 p.
- Lowry, W.P. y P.P. Lowry II. (1989). *Fundamentals of biometeorology, Interactions of organisms and the atmosphere*. Preaville Publications Mc Minnville, Oregon.
- Martín-Vide, J. (2003). *El tiempo y el clima*. Editorial Rubes, Barcelona. 127 p.
- Oke, T.R., G. Mills, A. Christen y J.A. Voogt (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 509 p.
- Pavía, E. G., F. Graef y J. Reyes (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *Int. J. of Climat.* 29: 1324-1329.
- Pielke, Jr. R. A., C. Landesa, M. Mayfield, J. Laver y R. Pasch (2005). Hurricane and global warming. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 88: 1571-1575.
- Romero-Dávila, S., C.C. Morales-Méndez y X. Antonio-Némiga (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*, 11: 1-10.
- SEMARNAT-INECC (2018). *México. Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Editado por SEMARNAT e INEEC, México, 751 p. PDF disponible en <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/>

- SMN. (18 de 06 de 2021). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de Normales Climatológicas por Estado: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=col>
- Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. App. Met.*, 18: 861-873
- Tejeda-Martínez, A. (1994). On the evaluation of the wet bulb air temperature as a function of dry bulb temperature and relative humidity. *Atmósfera*, 7: 179-184 Falta título del artículo
- Tejeda, A. y J. Cervantes (1994); Manejo y presentación de datos de viento superficial, *Geografía y Desarrollo*, Vol. 2:49 – 57. Referencia huérfana, no está citada en el texto
- Tejeda-Martínez, A. y Gómez-Azpeitia, G., compiladores (2015). *Prontuario solar de México*, Universidad de Colima y Universidad Veracruzana, 149 páginas, ISBN978-607-8356-45-4. www.ucol.mx/publicacionesenlinea
- Tejeda-Martínez, A., I.R. Méndez-Pérez, N.C. Rodríguez y E. Tejeda-Zacarías (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima, Colima, 263 p. www.ucol.mx/publicacionesenlinea/
- Toon, O. B., A. Robock y R. Turco (2008). Environmental consequences of nuclear war. *Physics Today* 61: 37-42.
- WMO. (2021). *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-no. 8. Vol .1). Geneva: World Meteorological Organization. Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11614

3. EL BIOCLIMA

3.1. El clima, los seres vivos y la civilización

En los primeros decenios del siglo XX, el estudio de las comunidades bióticas desde un enfoque ecosistémico dio lugar a la identificación del “nicho ecológico” como un concepto básico, cuyo debate se emprendió desde dos perspectivas: el “nicho como hábitat” planteado por Joseph Grinnell en 1917 (Grinnell, 1917) y el “nicho como rol” argumentado por Charles Elton en 1927 (Elton, 2001). Sin embargo, no fue sino hasta la segunda mitad del siglo que G. Evelyn Hutchinson (1957) lo asume como un “hipervolumen de n dimensiones”, es decir, una abstracción no necesariamente territorial pero que se concretiza en un territorio o hábitat, cuyas múltiples dimensiones las constituyen las condiciones ambientales que cada organismo o especie requiere para lograr su “modo de vida” y particularmente para que su población persista. Entre tales condiciones destacan el clima y recursos naturales como luz, agua, alimento, estructura, etc. Esta lista de condiciones y recursos ideales para cada especie en particular, Hutchinson la llama “nicho fundamental” a diferencia del “nicho realizado”, cuyas magnitudes reales se ven acotadas por las características físicas del hábitat y la competencia con otras especies. Así pues, desde el punto de vista de la ecología como ciencia, el clima es un factor esencial para el desarrollo, evolución y persistencia de las especies, incluida la del homo sapiens, quien sólo puede prosperar en el marco de unas condiciones ambientales apropiadas.

Casi al mismo tiempo que los ecólogos y zoólogos acuñaban el concepto de “nicho ecológico”, geógrafos y antropólogos, entre los que cabe destacar a Ellsworth Huntington y a Herbert John

Fleure, encontraron evidencias de la relación operante entre el clima y la cultura material e inmaterial producida por cada comunidad humana, eso que llamamos “civilización”. Según Huntington (1915), donde se han presentado la mayor vitalidad y progreso en el mundo han coincidido con las áreas templadas limítrofes entre las grandes regiones frías y tórridas del planeta. Ahí, las tormentas —menos violentas que las tropicales— producen vientos, bajan la temperatura del aire, desencadenan descargas eléctricas, y como consecuencia, dejan cargada la atmósfera con una sobresaturación de ozono que a su vez limpia y despeja la atmósfera. Todo ello influye poderosamente en la vitalidad del organismo humano. Cuando las grandes zonas templadas se desplazan por efectos de la dinámica atmosférica y planetaria, la historia registra una franca decadencia de la civilización ahí asentada.

Por su parte, Fleure (1919) amplió el enfoque de esa estrecha relación entre el clima y la civilización como una dinámica de ida y vuelta. Planteó que las sociedades humanas no sólo son sometidas a las características naturales de su hábitat (nicho fundamental), sino que a su vez pueden configurar sus propios entornos (nicho realizado). De ahí que consideraba al concepto de “ambiente” como un término de valoración cultural, dejando la connotación de “regiones naturales” bajo sospecha.

Los planteamientos de Huntington y Fleure, más allá de su vigencia en la actualidad, son importantes por su calidad de pioneros. Así, al paso de los años y mediante el análisis de numerosas evidencia colectadas, más allá de los ámbitos puramente ecológicos o antropológicos, el estudio de la reciprocidad entre el clima y la distribución de los seres vivos sobre el planeta, es decir, del *bioclima*¹⁷, se consolidó como una rama de la climatología cuya

17 El diccionario de la Real Academia Española no incluye el término *bioclima*, pero el concepto es ampliamente usado para designar al tipo de clima —claramente diferenciado de otros climas— que incide en el desarrollo y la supervivencia de determinados organismos vivos (Pérez Porto & Merino, 2018).

terminología técnica fue establecida por Scaetta (1935), quien planteó los términos de *biometeorología*, para señalar la relación de los procesos biológicos y antropogénicos con determinadas condiciones del tiempo meteorológico y *bioclimatología*, respecto de esa misma relación, pero durante periodos extensos que dan lugar a una conceptualización climática. Poco a poco se fueron multiplicando los estudios dedicados a muy diversos ámbitos bajo el enfoque interdisciplinar de la bioclimatología. Esa dinámica de colaboración se formalizó en una Sociedad Internacional de Bioclimatología y Biometeorología (ISB por sus siglas en inglés), en cuya primera reunión, realizada en 1956 bajo los auspicios de la UNESCO, se dejó muy claro que la bioclimatología no se trataba de una ciencia nueva y tampoco un campo de estudios unificado. Ahí se reconocieron cuando menos ocho campos de interés: médico, botánico en general, agrícola, forestal, zoológico en general, veterinario, entomológico y cósmico, pero la Sociedad se manifestó abierta a que pudieran sumarse otras áreas emergentes (Delaney & Waterhouse, 1956).

Como se ve, la declaratoria no menciona el área de estudio relativa a la influencia del clima sobre el desarrollo de uno de los productos culturales más determinantes de la civilización: los edificios y sus espacios habitables, pero esa omisión ha quedado resuelta. Actualmente la ISB sí considera como una de sus áreas de interés, la del “entorno edificado” que incluye los aspectos de planeación, diseño urbano y arquitectura (International Society of Biometeorology, 2020).

3.2. Bioclimática

La palabra *bioclimático* o *bioclimática*, incorporada al Diccionario de la Real Academia Española (RAE) desde 2012¹⁸, puede interpretarse

18. Oficialmente está incluida desde la 23ª edición en su versión impresa (2014), pero en la versión en línea apareció por primera vez en la actualización de la edición 22.5 en junio de 2012.

desde dos aproximaciones. Una general que designa todo lo “relacionado con el clima y los organismos vivos”, y una particular que se refiere a lo “dicho de un edificio o de su disposición en el espacio: Que trata de aprovechar las condiciones medioambientales en beneficio de los usuarios” (RAE, 2019a). Pero ambas definiciones consideran a la palabra como un adjetivo, no un sustantivo.

Mucho antes que la RAE incluyera el término a su diccionario, Sergio Los (1983) se oponía a que se generalizara el término “arquitectura bioclimática” por el riesgo de que lo “bioclimático” fuera considerado como optativo. A su vez, Rafael Serra (1996) dirigía una fuerte crítica a la tendencia de adjetivar la arquitectura, pues para él siempre debería entenderse al hecho arquitectónico como un fenómeno global y no “como un determinado tipo de edificios que necesitan llevar un calificativo detrás”.

A pesar de esas advertencias, la tendencia a adjetivar la arquitectura siguió avanzando¹⁹. Sin embargo, la palabra ha conquistado su sitio —no sin dificultad—, como un sustantivo —*la bioclimática*— que designa a una disciplina técnica cuya particularidad consiste en la aplicación práctica de conocimientos emanados de la bioclimatología y la termodinámica al diseño y construcción de espacios habitables. Y esa es la acepción que se aplicará en lo sucesivo en este libro.

Ahora bien, “habitable” es el punto clave en el que hay que ahondar. Habitar —vivir, morar, residir— implica diferentes escalas y dimensiones. Todo espacio construido para ser habitable (edificio, vivienda, barrio, ciudad), podría caracterizarse como un conjunto de elementos y sus correspondientes interacciones

19. Tendencia —impulsada sobre todo por los medios de comunicación masiva y recientemente también por las redes sociales— que, como dice Benjamín Barney, “no sería de mayor importancia si no fuera porque designar con estas palabras una arquitectura que con alarmante frecuencia no es ni bioclimática ni arquitectura, sólo porque es de moda o apenas un plagio de la arquitectura que entre nosotros aún se publica y premia, es del todo una situación aberrante” (Barney, 2013).

o interfaces que lo relacionan con los habitantes, sus necesidades y sus contextos. El espacio habitable vincula mediante sus componentes los factores humanos con los ambientales, a partir de lo cual se producen acciones y respuestas en un proceso de adecuación-adaptación que transforman la configuración inicial y convierten al hábitat con todos sus componentes en un sistema dinámico (el “nicho realizado” de Huntington). Así, la habitabilidad es resultado de un proceso de autorregulación entre un modo de vida y las condiciones que impone el medio natural mediante acciones de adaptación que pueden ir de lo más sencillo a lo más complejo (Gómez-Azpeitia & Gómez Amador, 2015).

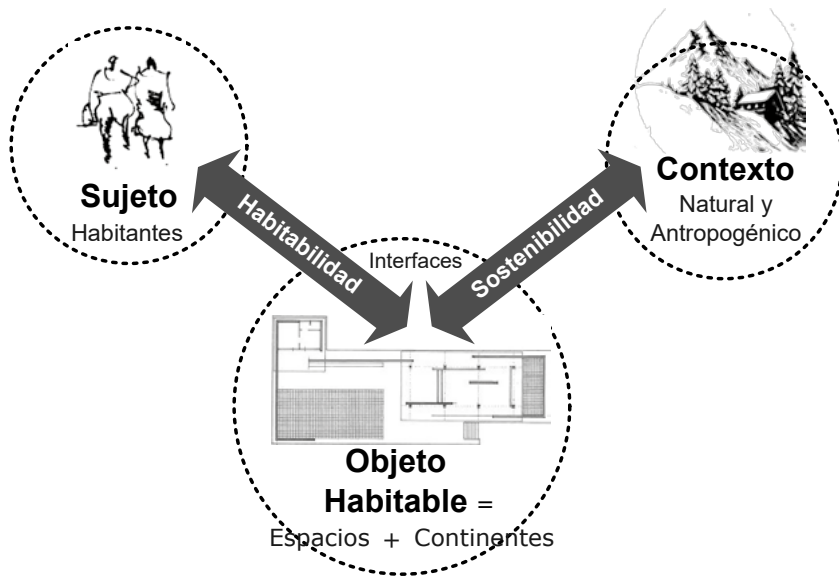


Figura 3.1. Interrelaciones entre el objeto habitable, los habitantes y su contexto.

En este sentido, la arquitectura se entendería como la suma de espacios habitables y sus continentes —o como los llamó Bruno Zevi (1978): los vacíos cerrados y los envases espaciales—, donde

la habitabilidad vendría a ser una interfaz que acopla al objeto habitable con el sujeto que la habita. Pero la materialización de esa acción de habitar tiene a su vez repercusiones en el contexto en que se consume, por lo que es necesario incorporar otra interfaz a fin de comprender al sistema en su complejidad. Esta interfaz, tan importante como la anterior, es la sostenibilidad que articula el funcionamiento del objeto habitable —operado por el habitante— con el hábitat en que se asienta. Bajo esta perspectiva, la bioclimática ocuparía un rol esencial en ambas interfaces. Su componente climática forma parte importante del contexto natural en que se asienta el objeto habitable, y por lo tanto de la interfaz de sostenibilidad. La necesidad de bienestar térmico del habitante es parte sustancial de su nicho ecológico fundamental, y por lo tanto de la interfaz de habitabilidad. El mapa conceptual de la figura 3.1 ilustra lo descrito.

Reyner Banham (1969) fue quizás el primero en captar cómo la dependencia del sujeto a las condiciones del contexto explica fehacientemente el devenir de la historia de la arquitectura y, sobre todo, del rompimiento de las arquitecturas vernáculas y tradicionales con la concepción altamente tecnologizada del movimiento moderno. Banham sugiere, a partir de evidencias arqueológicas, que el ser humano podría sobrevivir sin apoyos de control ambiental (ropa y arquitectura, por ejemplo) en cualquier lugar excepto en las zonas más áridas o más frías de la Tierra. No obstante, para esas áreas inhóspitas tanto como para el resto del planeta, ha desarrollado medios que le pueden proporcionar condiciones más habitables. En esa labor identifica dos grandes alternativas: la que llama estructural, es decir la arquitectura misma (paredes, cubiertas, plataformas) y la que denomina mecánica dependiente de energía suplementaria (fuego, calor y luz del sol, electricidad, etc.).

Por su parte, Steve V. Szokolay (1984) retoma los postulados de Banham y los expone a manera de ecuación:

*Condiciones ambientales – Condiciones de bienestar = Tarea de adaptación*²⁰

Lo anterior puede interpretarse de la siguiente forma: si las condiciones del medio son iguales que las condiciones que se requieren para operar cómodamente, entonces no se hace necesaria intervención alguna. En cambio, pongamos como ejemplo un caso en un clima extremadamente caluroso con temperaturas por encima de los 35 °C. Para que las personas puedan llevar a cabo su modo de vida, sin entrar en estrés térmico, digamos que deberían operar a unos 28 °C, como máximo, tendríamos el reto de bajar $35\text{ °C} - 28\text{ °C} = 7\text{ K}$ ²¹ la temperatura del espacio habitable. Esa sería nuestra tarea de adaptación, la cual puede solventarse mediante las dos alternativas identificadas por Banham:

- a. Medios²² pasivos (alternativa estructural): el edificio mismo, su forma, posición, materiales y acabados superficiales, así como instalaciones que dependen de energía no suplementaria, como la ventilación o el soleamiento; y
- b. Medios activos (alternativa mecánica): instalaciones basadas en alguna forma de energía suplementaria tales como la eléctrica, usualmente generada en centrales termoeléctricas a base de combustión de hidrocarburos o en centrales carboeléctricas.

Lamentablemente, tal como lo identifica Barham, la alternativa mecánica es siempre más atractiva ante las estrictas reglas de orientación, implantación y configuración espacial y volumétrica

20. El texto original de Szokolay llama al segundo término de la ecuación “Condiciones de confort” (*Comfort conditions*) y al resultado de la resta “Tarea de control” (*Control task*).

21. Es convención diferenciar las unidades de temperatura para discriminar cuando se trata de un dato puntual, mediante el uso de grados Celsius o centígrados (°C), y cuando se trata de un rango o franja de temperaturas, mediante el empleo de grados Kelvin (K), en el entendido de que en el caso de incrementos o longitudes 1°C equivale a 1 K.

22. El texto original de Szokolay habla de “controles” pasivos y activos.

que exige la arquitectura, por lo que, sin importar el clima, los hábitos y las circunstancias propias del sitio, la envolvente sellada y necesariamente mecanizada de una torre de oficinas con fachadas de vidrio termina imponiéndose en todos lados. Esto explica, “la avidez con la que los modernistas, desde Le Corbusier hasta los fantasiosos y visionarios de la década de 1960, han robado formas a otras tecnologías, pero también las inevitables decepciones cuando esas formas demostraron que no representaban mejoras ambientales y funcionales significativas” (Banham, 1969, pág. 289). Por eso el código ético de la bioclimática consiste en que la tarea de adaptación deba ser ejecutada por medios pasivos hasta donde sea posible, dejando los medios activos sólo para alguna tarea residual que no se haya logrado abatir:

$$\textit{Tarea de adaptación} - \textit{Medios pasivos} = \textit{Medios activos} \rightarrow 0$$

Es decir, donde la intensidad de los medios activos debe tender a cero.

Para continuar con el ejemplo, habíamos estimado la tarea de adaptación a emprender en una magnitud de 7 K. Vamos a suponer que un diseño acertado del edificio puede paliar hasta 4 K de esa tarea. Quedan entonces 3 K como tarea residual. El compromiso implícito en el diseño con enfoque bioclimático exhorta que se consideren dispositivos mecánicos sólo para esos 3 K y no, como desafortunadamente suele suceder, para esa tarea y además para corregir el malestar que se incrementa por el desacertado diseño del edificio.

Esta interpretación de los postulados de Banham la formuló Szokolay en 1984, y si bien sigue vigente la visión ecosistémica de su primer enunciado, existen desajustes o imprecisiones en el segundo, originados por cuando menos tres coyunturas históricas que han cambiado la realidad contemporánea:

- a. El calentamiento global de la atmósfera por efecto de la emisión de GEI (véase la Introducción y la sección 2.2

Clima: pasado, presente y futuro de este libro), con lo que los medios disponibles para solventar la tarea de adaptación pueden precisarse en términos de su huella de carbono;

- b. El acelerado impulso y la creciente disponibilidad de tecnologías que producen energías activas basadas en energías no suplementarias, como la fotovoltaica y la eólica, con lo que la opción original, entre medios activos y pasivos, ha quedado obsoleta. Habría que considerar entonces, un tipo de medio disponible adicional para afrontar la tarea de adaptación: medios activos limpios; y
- c. Estudios que demuestran el papel determinante que los habitantes ejercen sobre el funcionamiento energético de los edificios (como se verá en los apartados que cierran el presente capítulo), por lo que el efecto de los medios tecnológicos debe ser tamizado por la forma en que son manejados por los habitantes.

Así, el segundo enunciado de Banham–Szokolay podría reformularse de la siguiente manera:

Tarea de adaptación – (Medios pasivos + Medios activos limpios + Participación activa de los habitantes) = Medios activos → 0

Aquí, la intensidad de los medios activos debe tender a una huella de carbono nula.

Continuando con el ejemplo, podemos reformular la solución de la tarea de adaptación, consistente en bajar 7 K la temperatura del ambiente, a la luz de la versión actualizada de la propuesta de Szokolay. Ya dijimos que el diseño acertado del edificio puede disminuir hasta 4 K de esa tarea. Las rutinas apropiadas de operar el edificio, por parte de los habitantes —abrir o cerrar ventanas o puertas; accionar o suspender fuentes o corrientes de agua; aumentar o reducir el efecto de elementos de sombra sobre el edificio; etcétera—, puede abatir otros 2 K más. El resto pueden lograrse mediante dispositivos de climatización activa (ventilado-

res, calefacción, aire acondicionado, etc.) pero alimentados por fuentes de energía limpia. Así, el uso de tecnologías basadas en energías suplementarias podría quedar abolido.

3.3 Confort térmico

Determinar las condiciones ideales de bienestar térmico para cada individuo, es el factor clave para la bioclimática. Pero ¿qué debemos entender por “bienestar”? Una de las definiciones incluida en el diccionario de la RAE, establece que se trata del “estado de la persona en el que se le hace sensible el buen funcionamiento de su actividad somática y psíquica” (RAE, 2019b). Luego entonces es un término correcto para designar ese estado-objetivo que nos ocupa. No obstante, el término empleado para ello, tanto por especialistas como por la población en general, es una palabra francesa, adoptada por el inglés, que a su vez se incorporó al español: “confort”.²³

El Oxford Dictionary define la palabra *comfort* como “el estado de permanecer físicamente relajado y sin dolor” (Oxford University Press, 2020). A su vez Szokolay (1984) puntualiza que el estado de confort se alcanza cuando podemos hacer lo que queremos sin estorbo y sin esfuerzo atribuibles a las condiciones del medio. El confort existe sólo cuando no se requieren tales esfuerzos. Givoni (2010) coincide con esta idea y define al confort térmico, en particular, como la “ausencia de malestar debido al calor o al frío” (Givoni B. , 2010). Por su parte la ASHRAE²⁴, en su norma 55, lo define como “la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” (ANSI/ASHRAE, 2021).

23. La palabra “confort” está reconocida en el diccionario de la RAE, precisamente como sinónimo de “bienestar o comodidad material” (RAE, 2019c).

24. Siglas en inglés de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

3.3.1 Factores que inciden en el confort térmico

El ambiente térmico, al que se refiere la definición de la ASHRAE, es sólo uno de los dos grupos de factores que intervienen en el proceso de disipación de calor del cuerpo humano, y por ende en la sensación térmica. El otro se compone de factores personales (Szokolay, 2008) (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Factores del confort térmico.

Factores Ambientales	Factores Personales	
	De acción transitoria	De acción prolongada
Temperatura del aire	Actividad (Tasa metabólica)	Aclimatación
Humedad del aire	Vestimenta	Hábitos alimenticios
Radiación		Forma del cuerpo
Movimiento del aire		Grasa subcutánea
		Edad y género
		Estado de salud

Fuente: Adaptado de Auliciems y Szokolay, 2007 (pág. 8)
y Szokolay, 2008 (pág. 17)

El ambiente térmico está determinado por el efecto de cuatro elementos climáticos: temperatura, humedad, radiación y viento. Su estudio implica dos formas de medición. La forma simple incluye el registro de:

- La temperatura del aire mediante un termómetro común. Para identificarla entre otras formas de medición se le denomina temperatura de bulbo seco (T_v), o simplemente temperatura ambiente (T). Su unidad de medida son los grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) o Kelvin (K) (véase la sección 2.3.3).
- La humedad del aire se mide de manera indirecta a través de un termómetro cuyo bulbo ha sido mojado. Esta práctica simula la temperatura que ocurriría en el caso de

la máxima saturación de humedad a la presión de vapor actual. A esta medida se le llama temperatura de bulbo húmedo (T_w) y sus unidades son °C, °F o K. Cuando se miden simultáneamente T_s y T_w y resultan iguales, se interpreta que la atmósfera está a su máxima saturación. En la medida de que T_w sea menor a T_s , menor será la humedad en la atmósfera respecto a la necesaria para la saturación. T_w nunca podrá ser mayor que T_s (véase la sección 2.3.4).

- La radiación en el ambiente interior se puede medir indirectamente con un termómetro cuyo bulbo o sensor se ha introducido dentro de una esfera pintada de negro. Este procedimiento simula la temperatura que alcanzaría un *objeto negro perfecto*²⁵ sometido a la radiación actual. A esta medida se le llama temperatura de globo negro o simplemente temperatura de globo (T_G) y se registra en °C, °F o K. Cuando se miden simultáneamente T_s y T_G y resultan iguales, se interpreta que hay un balance en el intercambio de calor radiante, en el que el ocupante no gana ni pierde calor por esta vía. En la medida que T_G sea mayor que T_s , mayor radiación estará recibiendo el ocupante, proveniente de las superficies que delimitan el recinto. Por el contrario, en la medida que T_G sea menor que T_s , mayor radiación cede el ocupante a su entorno, lo cual constituye un efecto refrigerante.
- Del movimiento del aire (o viento) se mide directamente su rapidez por medio de un anemómetro. Al concepto de rapidez suele denominarse velocidad (v) y su unidad de medida es metros por segundo (m/s) (véase la sección 2.3.5).

25. Gustav Kirchhoff denominó *objeto negro perfecto* a aquel que absorbe la totalidad de la radiación incidente, no la refleja ni transmite, pero sin embargo es capaz de emitirla. Es un concepto teórico pero que corresponde con mucha aproximación al comportamiento de algunos cuerpos.

La forma compuesta o derivada incluye entre otras:

- La humedad relativa (H_R) que expresa el porcentaje que ocupa el vapor de agua en la mezcla del aire en función del necesario para saturar esa mezcla con vapor de agua. Se calcula a partir de la T_s y la T_w (véase la tabla 2.3).
- La razón de mezcla (r_w) que expresa la relación de gramos de vapor de agua por unidad de masa de aire seco (g /kg). Se calcula a partir de la presión atmosférica del sitio (P), la presión de vapor (e) y la presión de vapor de saturación (e_s), y estas últimas a su vez, se derivan de la T_s y la HR (véase la sección 2.3.4).
- La humedad específica (q) que determina la cantidad de vapor de agua que hay en la mezcla de aire. Su unidad de medida son gramos de agua por kilogramo de aire (g /kg) y se calcula a partir de la e y la P (véase la sección 2.3.4).
- La temperatura media radiante (T_{MR}) que expresa la temperatura de un recinto negro uniforme que intercambia la misma cantidad de calor radiante con el ocupante, que el recinto real. Puede considerarse como el promedio de la temperatura de las superficies que rodean al ocupante, ponderada por sus atributos espaciales (área, ángulo de visión respecto del ocupante, etc.) (ANSI/ASHRAE, 2021). Se obtiene así:

$$T_{MR} = T_G \left(1 + 2.35\sqrt{v}\right) - 2.35\left(T_s \sqrt{v}\right) \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde:

T_{MR}	Temperatura media radiante en °C
T_G	Temperatura de globo negro en °C
v	Velocidad del aire en m/s
T_s	Temperatura de bulbo seco o Temperatura ambiente en °C

Fuente: Szokolay, 2008 (pág. 18)

La ecuación 3.1 es válida solamente para mediciones con un globo estándar (de cobre, 15 centímetros de diámetro y una emisividad $\epsilon = 0.95$)²⁶. En el caso que el aire esté en calma ($v < 0.2$ m/s), como es común en algunos interiores, es viable considerar que:

$$T_{MR} = T_G \quad \text{Ec. 3.2}$$

En cuanto a los factores personales, podemos clasificarlos en dos subgrupos según la duración de su incidencia: de acción transitoria o de acción prolongada. Ambos afectan la sensación térmica del individuo, los primeros de forma determinante y los segundos contribuyen de manera complementaria (tabla 3.1).

Los factores personales de acción transitoria afectan la sensación térmica mientras ocurren, por lo que al momento de cesar o modificar su acción, cambian su efecto tras un tiempo de estabilización de entre 20 y 30 minutos (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 8). Así, aunque su influencia sea de poca duración, su impacto es determinante. Por tal motivo, se deben tomar en cuenta para calcular las condiciones de confort térmico. Los factores dentro de esta categoría son dos: la actividad física que realiza la persona y su vestimenta.

- La actividad física se expresa mediante la cantidad de energía corporal convertida en trabajo mecánico. El cuerpo humano produce calor de manera continua debido a sus procesos metabólicos a fin de mantener su funcionamiento básico, lo que se denomina *tasa metabólica basal* (M)²⁷. Adicionalmente se debe producir energía para tareas dife-

26. Se ha popularizado una versión más barata que cumple con la precisión necesaria, sustituyendo la esfera de cobre por una pelota de ping-pong pintada de negro (Szokolay, 2008, pág. 18).

27. Los factores que determinan la Tasa Metabólica Basal son: género, edad, peso y estatura. Se puede consultar un calculador online en <https://www.active.com/fitness/calculators/bmr>

rentes al funcionamiento basal, como la producción de trabajo mecánico (leer, escribir, caminar, correr, levantar pesas, etc.), lo que se llama *tasa metabólica* (W)²⁸. Su unidad de medida es el *met* equivalente a 58.2 W/m², que es la energía requerida para ejecutar trabajo sedentario en casa u oficina. Si se considera que la superficie del cuerpo humano promedio es aproximadamente 1.8 m²²⁹, esa labor produce alrededor de 105 W (1 *met*/m² x 1.8 m²). La tasa metabólica puede variar desde los 70 W (0.6 *met*/m² x 2 m²), cuando se duerme o se está en reposo profundo, hasta 700 W (6 *met*/m² x 2 m²) —o más— cuando se realiza un trabajo pesado o una actividad intensa. El calor así producido debe disiparse al ambiente o de lo contrario la temperatura del cuerpo puede elevarse y, por lo tanto, generar malestar o incluso llevar al organismo a situaciones de peligro (Szokolay, 2008, págs. 16-18). Un listado con las tasas metabólicas (W) calculadas para diferentes tareas, puede consultarse en la norma 55 de ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 7).

- La vestimenta opera como una capa de aislamiento térmico del cuerpo, cuyo objetivo consiste en evitar la disipación del calor producido metabólicamente. Por lo tanto, su efecto se manifiesta en la sensación térmica, en función del grado de aislamiento que confiere. Para efectos del estudio del fenómeno del confort térmico, se ha establecido una unidad específica para medir su magnitud. Se le denomina *clo* y corresponde al aislamiento que dispensaría una capa cubriendo la totalidad del cuerpo, equivalente a una transmitancia de 6.45 W/m²K (es decir, una resistencia de 0.155 m² K/W). Un *clo* corresponde al aislamiento que otorga un

28. Aquí W se toma de *work*. No confundir con la unidad de energía Watt, que comparte la misma literal: W

29. Estimación para una persona de sexo masculino de 1.73 m de estatura y 70 kg de peso (ASHRAE, 2021). En general las mujeres y niños tienen menor área corporal.

traje ligero de oficinista (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 9). En la medida que el individuo agregue o se despoje de prendas, su factor de aislamiento se modificará de manera proporcional. Por eso su efecto en la sensación térmica es relevante y casi inmediato. La norma 55 de ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 8) contiene una lista de prendas de vestir y su correspondiente factor *clo*. Para efectos ilustrativos, la magnitud de aislamiento en unidades *clo* de diferentes conjuntos de vestimenta, se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Aislamiento de diferentes conjuntos de vestimenta en unidades *clo*. Fuente: Auliciems y Szokolay (2007, pág. 9)

Los factores personales de acción prolongada inciden directamente sobre una o ambas tasas metabólicas (*M* y/o *W*) y, por lo tanto, en la sensación térmica. Dado que *M* y *W* sí forman parte de los procesos para determinar las condiciones de confort, y que estos factores se consideran implícitos en ellas, no es necesario expresarlos en las fórmulas correspondientes. Los factores son: aclimatación, hábitos alimenticios, forma del cuerpo, grasa subcutánea, género, edad y estado general de salud. La explicación de cada uno de ellos, presentada a continuación, fue tomada mayormente de Szokolay (2008, pág. 19):

- La aclimatación es el proceso mediante el cual los organismos se habitúan a los cambios del ambiente, y en el

caso que nos ocupa, específicamente del ambiente térmico. Tiene una acción transitoria cuando la exposición al ambiente es de corta duración, por ejemplo, mientras se está en un recinto o se porta una prenda. Cuando ocurre el cambio, —salir o cambiar de habitación; agregar o despojarse de ropa— la sensación térmica cambia. Pero puede interpretarse también en términos de acción prolongada, cuando se está expuesto a un determinado clima durante un período mayor a seis meses, y el individuo desarrolla cambios fisiológicos para adaptarse y así conservar energía metabólica. Estos cambios incluyen mecanismos de regulación vasomotora (dilatación o constricción de los vasos sanguíneos) y evaporativa (sudoración) (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 8). Cuando el individuo viaja a otro clima, experimenta una sensación térmica supeditada al régimen térmico al que está acostumbrado y no al que en realidad se encuentra.

- Los efectos de las bebidas y los alimentos consumidos sobre las tasas metabólicas pueden variar con el tiempo, ya sea que formen parte del régimen habitual de alimentación, en cuyo caso su efecto se extiende debido a ajustes endocrinos; o bien por la ingesta ocasional de una bebida o un alimento, en cuyo caso su efecto es temporal.
- La forma del cuerpo tiene cierta contribución en la sensación térmica puesto que la producción de calor ($M+W$) es proporcional a la masa corporal, y su disipación depende del área superficial del cuerpo. Una persona alta y delgada, al tener una relación superficie-volumen alta, puede disipar el calor más rápidamente que una persona corpulenta, por lo que tolera mejor las temperaturas altas, y viceversa. El índice de masa corporal (IMC), introducido por Keys et al. (1972) se calcula:

$$IMC = \frac{p}{h^2} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde:

IMC Índice de masa corporal, adimensional

p Peso, en kg

h Estatura, en m

Fuente: Keys et al. (1972)

Por su parte, el área superficial del cuerpo puede estimarse con la expresión de Du Bois:

$$A_D = 0.202(p^{0.425})h^{0.725} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde:

A_D Área de Du Bois, en m^2

p Peso, en kg

h Estatura, en m

Fuente: Szokolay (2008, pág. 18)

- El efecto anterior se acentúa (disminuye) con la mayor (menor) presencia de grasa subcutánea que actúa como aislante térmico. A mayor espesor de grasa, la persona preferirá temperaturas más bajas. Para calcular el porcentaje de grasa corporal se usan métodos de bioimpedancia, escáneres corporales 3D, pletismografía de desplazamiento aéreo y pesaje hidrostático, entre otros. También existen métodos indirectos más simples, que consideran las circunferencias y los pliegues de la piel en las regiones con más grasa corporal en el abdomen, la espalda, el brazo o el muslo.³⁰
- El género y la edad son factores que intervienen de manera directa en la operación de los factores anteriores, y por lo tanto de manera indirecta en las tasas metabólicas.

30. Una calculadora online de porcentaje de grasa corporal considera el género, el peso y las circunferencias de cintura, cadera, antebrazo y muñeca. Puede consultarse en: <https://www.active.com/fitness/calculators/bmi>

Sin embargo, las diferencias en las preferencias térmicas atribuibles al género y la edad suelen ser de poca magnitud. En condiciones especiales relativas a la salud reproductiva femenina (como podrían ser el embarazo, los periodos menstruales, la menopausia o el climaterio), esas diferencias pueden acentuarse.

- El estado de salud general es importante en la determinación de las condiciones de confort térmico, en la medida que algunos padecimientos alteran la producción de calor metabólico. La fiebre sería una manifestación típica de esas alteraciones. Por tal motivo, los estándares de confort se establecen exclusivamente para personas sanas.

3.3.2. Índices de confort térmico

Dado que los factores que inciden en el fenómeno de la sensación térmica no actúan separadamente, sino de forma combinada, ha sido necesaria la construcción de índices que asocian los efectos de dos o más de ellos, con el fin de facilitar las tareas de establecer límites o umbrales de exposición precautorios que puedan evitar afectaciones a las personas, así como de identificar los imprecisos bordes de la zona de confort —entre otros propósitos—. A continuación, se describen algunos de los índices más empleados.³¹

- Temperatura Efectiva (TE) y Temperatura Efectiva Corregida (CET).

El índice TE es el más antiguo y su predominancia ocupó prácticamente 50 años. Fue desarrollado en EUA por Houghten y Yagloglou (1923) con el propósito de asociar el efecto de la temperatura con la humedad. Se define como la temperatura de un ambiente saturado de humedad y sin movimiento de aire que,

31. El listado de índices de confort térmico es muy extenso y excede el propósito de este libro. Para quienes deseen ahondar sobre el tema, se recomienda la lectura del reporte *Thermal Comfort* de la Asociación Internacional PLEA (Auliciems & Szokolay, 2007, págs. 22-42).

en ausencia de radiación, podría generar el mismo efecto que el ambiente en cuestión. Se determina así:

$$TE = T_s - \left[0.4 (T_s - 10) \left(1 - \frac{HR}{100} \right) \right] \quad \text{Ec. 3.5}$$

donde:

- TE Temperatura efectiva en °C
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- HR Humedad relativa en %

Fuente: Auliciems y Szokolay, 2007 (pág. 22)

Olgay (1963) lo utilizó para la delimitación de la zona de confort térmico de su Carta Bioclimática.

Se considera que la TE sobreestima el efecto de la humedad, por lo que fue descartado y sustituido por otros índices, como el denominado Temperatura Efectiva Corregida (CET), desarrollado por la ASHVE³² (1932) que incorpora en su formulación las temperaturas de globo (T_G) y de bulbo húmedo (T_w) y se calcula en función de la velocidad del aire (v) y el factor de arropamiento (clo):

Para un factor de arropamiento medio, $clo = 1.0$, y una velocidad del aire $v \approx 0.1$ m/s

$$CET = \frac{(1.21T_G - 0.21T_w)}{1 + 0.029(T_G - T_w)} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Para un factor de arropamiento ligero, $clo = 0.5$, y una velocidad del aire $v \approx 0.1$ m/s

$$CET = \frac{(0.944T_G - 0.056T_w)}{1 + 0.022(T_G - T_w)} \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde:

- CET Temperatura Efectiva Corregida en °C
- T_G Temperatura de globo negro, en °C

32. Siglas en inglés de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción y Ventilación.

T_w Temperatura de bulbo húmedo, en °C

Fuente: Auliciems y Szokolay, 2007 (pág. 23)

Para evitar un fatigoso proceso de cálculo, pues habría una fórmula diferente para cada combinación de arropamiento y velocidad del aire, la ASHVE decidió hacer la publicación del índice acompañada de nomogramas que facilitan su estimación, los cuales rápidamente se popularizaron (figura 3.3). Desde luego, una hoja de cálculo puede sustituir a estos nomogramas, como en cierta forma lo hace *bioclimarq.*

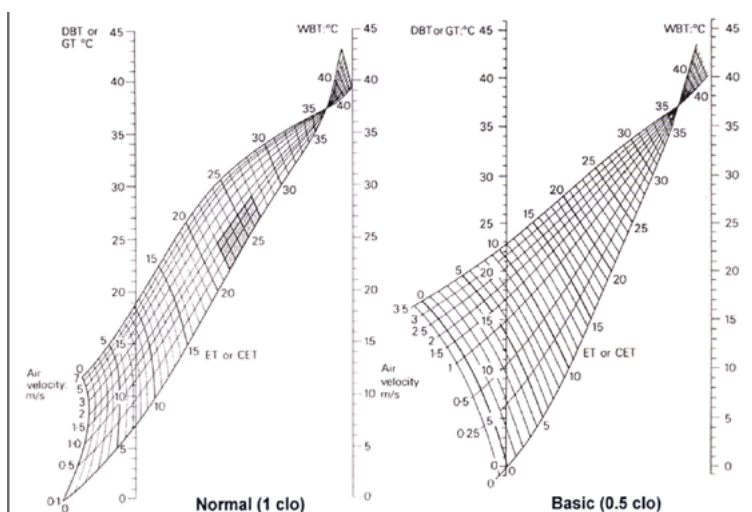


Figura 3.3. Nomogramas para le estimación de la CET en función del factor de arropamiento (*clo*). Fuente: Auliciems y Szokolay (2007, pág. 23)

Este índice, en climas cálidos, subestima el efecto de la humedad, al igual que el efecto de calentamiento generado por el movimiento del aire a temperaturas superiores a 32 °C (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 23).

- Índice de estrés térmico (ITS).

Fue desarrollado en Israel por Givoni (1963), con el fin de estimar la tasa de enfriamiento producida por la sudoración necesaria para mantener el equilibrio térmico bajo determinadas condi-

ciones. Es un modelo biofísico de los mecanismos de intercambio de calor entre el cuerpo y su entorno, con el que se puede calcular el estrés térmico total, considerando tanto procesos metabólicos como ambientales. La acción conjunta de los factores climáticos se expresa aquí como parte de los intercambios de calor, tanto convectivos (a través del aire, donde operan la temperatura y su tasa de movimiento) como radiativos (regida por la radiación, obviamente), y dentro de la eficiencia de enfriamiento por sudoración (fuertemente determinada por la humedad del aire). Su formulación matemática es bastante compleja y extensa, pero su forma general se expresa de la siguiente manera.

$$S = \left[(M - W) \pm C_V \pm C_R \right] \left(\frac{1}{f_{sw}} \right) \text{ Ec. 3.8}$$

donde:

S	Tasa de sudoración requerida
M	Tasa metabólica basal
W	Tasa metabólica
C_V	Intercambio de calor por convección
C_R	Intercambio de calor por radiación
f_{sw}	Eficiencia de enfriamiento por sudoración, adimensional

Nota: Las unidades para todos los términos, excepto f , son kilocalorías por hora (kcal/h) equivalentes.

Fuente: Givoni, 1969 (págs. 83-84)

La importancia del índice radica en que fue empleado para la determinación de la zona de confort térmico de la carta bioclimática para edificios (BBCC³³) propuesta por el propio Givoni. A diferencia de la BBCC, el índice no tuvo tanta influencia, en parte debido a su complejidad, pero también por las unidades de medición utilizadas, propias para fines nutricionales, pero poco usadas

33. Siglas en inglés de *Buildings Bio Climatic Chart*.

con propósitos de confort térmico; para Auliciems y Szokolay (2007, pág. 34) son obsoletas.

- Temperatura operativa (T_{op}).

Índice desarrollado por Winslow, Herrington y Gagge (1937), en el Reino Unido. El estudio que le dio origen se llevó a cabo en un clima frío, donde el efecto de la humedad es limitado, el movimiento del aire en los espacios interiores suele ser irrelevante, pero el aporte radiante del edificio es significativo. Por tal motivo integra solamente la T_s y la T_{MR} (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 25) aunque condicionado a la velocidad del aire (v). Se define como la temperatura uniforme de un recinto imaginario negro, en el cual el ocupante podría intercambiar la misma cantidad de calor por radiación y convección que en un ambiente real no uniforme (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 5). Existen varias fórmulas para su cálculo, pero la propuesta por la ASHRAE es la más sencilla:

$$T_{op} = A(T_s) + (1 - A) T_{MR} \text{ Ec. 3.9}$$

donde:

- T_{op} Temperatura operativa, en °C
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- T_{MR} Temperatura media radiante, en °C
- A Coeficiente en función de la velocidad del aire (v) según la tabla 3.2

Tabla 3.2. Coeficiente A para el cálculo de la Temperatura Operativa (T_{op}).

v	< 0.2 m/s	0.2 a 0.6 m/s	0.6 a 1.0 m/s
A	0.5	0.6	0.7

Fuente: ANSI/ASHRAE (2021, pág. 27)

Cuando dentro del espacio a evaluar no existen fuentes radiantes accesorias —paneles radiantes de calefacción o refrigeración, factor de ganancia solar a través de ventanas mayor a 0.48, equipos eléctricos que disipen calor, etcétera— y la envolvente edilicia esté convenientemente aislada, se puede considerar que:

$$T_{op} = T_s \quad \text{Ec. 3.10}$$

Fuente: ANSI/ASHRAE (2013, pág. 16)

Para la mayoría de los casos prácticos donde la $v < 0.2$ m/s, o donde la diferencia entre T y T_{MR} es menor a 4 °C, la T_{op} se puede estimar con bastante aproximación como un promedio de T_s y T_{MR} :

$$T_{op} = \frac{(T_s + T_{MR})}{2} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Fuente: ANSI/ASHRAE (2013, pág. 16)³⁴

El hecho de que el índice se desarrollara en (y para) climas fríos limita su aplicación a temperaturas altas, frecuentes en los climas tropicales, en los que el factor de humedad es más determinante que la radiación. De hecho, Givoni (1962) considera que el índice no es apropiado para T_s superiores a 27 °C, ya que no toma en cuenta la disipación de calor por evaporación. No obstante, la sencillez en la formulación de la T_{op} ha permitido que sea incorporada a otros índices, así como a diversos estándares de confort térmico (por ejemplo ANSI/ASHRAE 55 y EN 15251³⁵, entre otras).

- Nueva temperatura efectiva (ET*) y Temperatura efectiva estándar (SET).

A diferencia de los anteriores índices que son de carácter empírico, ET* y SET son de carácter analítico, y se basan en el modelo teórico llamado de “dos nodos” o “2-Node”, que se comentará en la sección 3.3.3. El índice ET* se define como la temperatura (T_s) de un ambiente cerrado uniforme a 50% de humedad relativa (H_R), en el cual se produciría el mismo intercambio neto de calor por radiación, convección y evaporación, que en el ambiente real en cuestión (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 36).

34. Estos casos especiales para el cálculo de la T_{op} , previstos en la versión 2013 de la norma 55 de ASHRAE, han sido omitidos en la última edición (2020).

35. La última actualización data de 2012. Actualmente sin vigencia.

A su vez, el índice SET es un subproducto de ET* bajo condiciones estandarizadas de arropamiento y actividad (Gagge, Fobelets, & Berglund, 1986). El propósito de la estandarización es predecir la temperatura promedio del cuerpo y así proporcionar una base racional para medir la equivalencia de cualquier combinación de factores ambientales, vestimenta y tasa metabólica (Auliciems & Szokolay, 2007, pág. 41). La SET se define como la temperatura de un ambiente imaginario a 50% de H_R , velocidad del aire $v < 0.1$ m/s y $T_s = T_{MR}$, en el cual la pérdida de calor total de un ocupante imaginario, con un nivel de actividad de 1.0 *met* y nivel de arropamiento de 0.6 *clo*, es el mismo que de una persona en el ambiente real, con niveles de vestimenta y actividad reales (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 5).

Este índice se aplica en el trazado de la zona de confort de la carta bioclimática de Szokolay (2008, págs. 123-125) así como de las zonas de confort propuestas por la norma 55 de ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021, págs. 12-13, 16).

- Humidex

El índice Humidex, es una propuesta de meteorólogos canadienses que tiene por objeto establecer niveles de incomodidad y riesgo en condiciones cálidas y húmedas, a fin de dar alertas a la población. En uso desde 1965 y revisado por Masterson y Richardson (1979), consiste en combinar valores de T_s y HR en un número que refleja la temperatura que percibiría una persona promedio sometida a esas condiciones. Por ejemplo, un valor de Humidex de 40 significa que la sensación de calor que se experimenta a 30 °C (T_s) con una determinada H_R , por ejemplo de 65%, es más o menos la misma que se sentiría a 40 °C con aire seco. La utilidad del índice ocurre cuando T_s es igual o mayor a 20 °C. Valores arriba de 40 generan malestar importante por lo que en tales condiciones deben evitarse esfuerzos físicos. Cuando Humidex es igual o superior a 46, debe interpretarse como una condición peli-

grosa que puede inducir a un golpe de calor severo (Government of Canada, 2019a).

Humidex se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H_x = T_s + \frac{5}{9}(e - 10) \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde:

- H_x Índice Humidex, en °C
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- e Presión de vapor, en hPa (mbar)

$$e = 6.11 \cdot 5417.753 \left(\frac{1}{273.16} \right) \left(\frac{1}{273.16 + T_d} \right) \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde:

- T_d Temperatura de punto de rocío, en °C
- 5417.753 Constante basada en el peso molecular del agua, el calor latente de evaporación, y la constante universal de los gases

Fuente: (Government of Canada, 2019b)

Para calcular la presión de vapor e , en vez de la Ec. 3.13 se pueden usar las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 o 2.8, si en lugar de que la variable independiente sea la temperatura del aire, es la temperatura de punto de rocío. Otro procedimiento más sencillo es el siguiente: si se tienen datos de HR y T_s , entonces con cualquiera de las ecuaciones 2.5 a 2.8 se obtiene la presión de vapor de saturación e_s y $e = (HR * e_s) / 100$; de esta manera se evita el cálculo de la T_d .

La temperatura de punto de rocío (T_d) es la temperatura a la que se satura el aire (se alcanza una humedad relativa del 100%, pero sin que varíe la razón de mezcla ni la humedad específica) por enfriamiento adiabático, es decir, sin intercambiar calor con sus alrededores. Es el paso previo para que se condense el vapor de agua contenido en el aire para formar, eventualmente, rocío,

neblina, cualquier tipo de nube o incluso escarcha cuando la temperatura es muy baja. Hay varias fórmulas de recurrencia, pero una de las más usadas es la siguiente:

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} (112 + 0.9T_s) + (0.1T_s) - 112 \quad \text{Ec. 3.14}$$

donde:

T_d Temperatura de punto de rocío, en °C

T_s Temperatura de bulbo seco, en °C

HR Humedad relativa, en %

El índice Humidex no ha sido empleado para cuestiones relacionadas con el cálculo o trazo de modelos de confort térmico, pero ha resultado muy útil para expresar los escenarios que podrían esperarse como consecuencia del proceso de cambio climático por el que atravesamos en la actualidad (véase la sección 4.3 de este libro).

3.3.3 Enfoques teóricos

La manera en que confluyen los factores, procesos y mecanismos para que el individuo llegue a una sensación térmica de confort se explica mediante dos enfoques teóricos diferentes.³⁶

Enfoque analítico

Este enfoque reduce el fenómeno a un balance de las cargas térmicas que se intercambian entre el cuerpo humano y su ambiente inmediato, debido al proceso químico del metabolismo y al proceso fisiológico de termorregulación en respuesta a los elementos externos del clima (Critchfield, 1974).

Cuando el balance térmico arroja un valor cero, es decir cuando el cuerpo humano gana la misma cantidad de calor que cede, significa, según este enfoque, que las personas experimentan una sensación térmica neutra. En cambio, si las condiciones del entor-

36. Para una perspectiva más detallada de los enfoques teóricos del confort térmico, véase: Gómez-Azpeitia, et al. (2007).

no generan pérdida de calor en el cuerpo humano (balance negativo), se considera como sensación térmica de frío. Por el contrario, si las condiciones del entorno generan ganancia de calor (balance positivo), se considera como una sensación térmica de calor. Cuando ocurre cualquiera de estos desenlaces, se desencadenan diferentes procesos fisiológicos — como la sudoración o la vasoconstricción— tendientes a mantener la temperatura del núcleo interno del cuerpo, lo que origina sensación de incomodidad.

Esta aproximación teórica considera a todos los seres humanos iguales, tanto desde el punto de vista biológico como físico-químico, y desprecia sus diferencias geográficas, culturales y económicas, por lo que equipara los mecanismos de sensación térmica de todos los individuos y, por lo tanto, homologa límites de confort, independientemente de las condiciones del ambiente térmico en que se desenvuelven de manera habitual. Dicho de otra manera, desdeña la aclimatación de largo plazo y cualquier otra valoración subjetiva. Así, con el desarrollo de los primeros índices térmicos y bajo la premisa de la uniformidad universal en las necesidades de confort, se concluyó que la temperatura neutra para todo el orbe se localizaba alrededor de los 70 °F (21 °C), con algunas variantes relativas a la temporada (invierno o verano). Olgay (1963, pág. 17) hace un repaso de las temperaturas recomendadas para varios países en aras de establecer una zona de confort térmico, mismas que coinciden por estar alrededor de los 21 °C. Sin embargo, reconoce que los límites de la sensación cómoda para las zonas cálidas se localizan por encima de esa temperatura (entre 23.3 y 26.7 °C).

La universalidad de aplicación de este enfoque originó una amplia aceptación, especialmente cuando empezó a popularizarse el aire acondicionado alrededor del mundo a mediados del siglo XX.³⁷ Miles de equipos fueron —y siguen siendo— calculados en

37. Las primeras aplicaciones de los dispositivos de aire acondicionado desarrollados

regiones templadas o cálidas para funcionar alrededor de los 21 °C como temperatura ideal.

Bajo este enfoque, los estudios se realizan en cámaras de clima controlado en las que los voluntarios se someten a un cuestionario sobre su sensación y preferencia térmica. El cuestionario consiste por lo regular en una escala subjetiva de siete puntos, basada en la desarrollada por Bedford (1936) que ha sido actualizada en las normas 55 de ASHRAE (2021) y 10551 de la ISO³⁸ (2005a) (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Comparación de las escalas subjetivas de sensación térmica

	ASHRAE	Bedford
+3	Caluroso	Demasiado Cálido
+2	Cálido	Muy cálido
+1	Ligeramente cálido	Confortablemente cálido
0	Neutro	Confortable
-1	Ligeramente fresco	Confortablemente fresco
-2	Fresco	Muy fresco
-3	Frío	Demasiado frío

Fuente: Auliciems & Szokolay (2007)

Pavi Ole Fanger (1970) es a quien se debe la teorización más importante del enfoque analítico. Su hipótesis consiste en que el valor de la temperatura de confort térmico puede definirse en términos del estado físico de las personas, y no en términos de las condiciones del ambiente térmico. En consecuencia, ese valor puede derivarse de una ecuación de balance térmico humano para una persona dada a un nivel de actividad dado, donde la por Willis Carrier se concentraron en plantas industriales de EUA durante las dos primeras décadas del siglo XX. Poco a poco fueron conquistando otros géneros de edificios, como tiendas departamentales y cines. Al finalizar los años 20's ofrecieron un sistema doméstico. La Gran Depresión de 1929 y las dos guerras mundiales impidieron la propagación de la tecnología. No fue sino hasta finalizar la Segunda Guerra Mundial que el sistema se popularizó en todo el mundo (Carrier, 2020).

38. Siglas en inglés de la Organización Internacional para la Estandarización.

condición es que la temperatura media de su piel y su secreción de sudor conserven valores dentro de límites estrechos. Así, registró las temperaturas de la piel y las pérdidas de calor por evaporación, experimentadas por varios sujetos en pruebas en una cámara climática, y luego las trató mediante procedimientos estadísticos, como funciones de la tasa metabólica. Estas relaciones estadísticas se insertaron en una ecuación general de balance térmico humano que se conoce como Ecuación de Confort de Fanger:

$$Lo = Hb - Ed - Esw - Ere - Lre - Rcb - Cvb \quad \text{Ec. 3.15}$$

donde:

Lo Acumulación de calor en el cuerpo.³⁹

Hb Producción interna de calor.

Ed Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel.

Esw Pérdidas de calor debidas a la sudoración.

Ere Pérdidas de calor latente debidas a la respiración.

Lre Pérdidas de calor por respiración seca.

Rcb Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido.

Cvb Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido.

Nota: Las unidades para todos los términos son kilocalorías por hora (kcal/h) equivalentes.

Fuente: (Gómez-Azpeitia, Bojórquez, & Ruiz, 2007, pág. 47)

Auliciems y Szokolay (2007, pág. 42) consideran que esta ecuación es probablemente el análisis más meticuloso y detallado

39. El calor acumulado se determina mediante un complicado cálculo iterativo que involucra las pérdidas y ganancias de calor del cuerpo por conducción, evaporación y radiación. El programa de cómputo que lo resuelve está disponible en el anexo D de la norma ISO 7730 (ISO, 2005b) y en el apéndice normativo B de la norma ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE, 2021).

que se haya hecho sobre la relación térmica humana con el entorno próximo. Fanger (1970), además, desarrolló herramientas para darle utilidad práctica a la teoría, lo cual se logra porque sus cálculos no se limitan a establecer solamente un procedimiento de balance térmico cuyo resultado arroja una magnitud de energía expresada en unidades térmicas (Lo), sino un valor expresado en unidades adimensionales que predice lo que un individuo normal con vestimenta regular y en actividad determinada podría opinar sobre su sensación térmica.

Así, como derivación de su planteamiento teórico, propuso dos de los estándares de confort térmico más aceptados hasta nuestros días: el voto medio predicho (PMV)⁴⁰ y el porcentaje predicho de insatisfechos (PPD)⁴¹. La influencia de estos estándares ha sido tan determinante que el enfoque teórico analítico suele denominarse “predictivo”.

Fanger llama “votos” a la respuesta de los voluntarios sobre su sensación térmica, cuando escogen una de las valoraciones de la escala subjetiva de Bedford (tabla 3.1). Considera, además, al confort térmico como el conjunto de condiciones bajo las que las personas eligen las tres categorías centrales de la escala, y no sólo la neutral, es decir que pueden estar entre lo “confortablemente fresco” y lo “confortablemente caluroso”, con lo que trata de absorber así los posibles desajustes entre la realidad objetiva y la opinión subjetiva de las personas. De esta forma, propone una fórmula para predecir ese voto:

$$PMV = (0.303 \exp^{-0.036M} + 0.028)Lo \quad \text{Ec. 3.16}$$

donde:

PMV Voto medio predicho, adimensional

M Tasa Metabólica, en W/m^2

40. Por sus siglas en inglés de *Predicted Mean Vote*.

41. Por sus siglas en inglés de *Predicted Percentage Dissatisfied*.

Lo Acumulación de calor en el cuerpo, en W/m²
exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Fuente: (ISO, 2005b)

Por su parte, el PPD se derivó de un análisis comparativo que Fanger desarrolló entre el PMV y resultados de estudios similares efectuados en Dinamarca y los Estados Unidos. En ese largo conjunto de datos, Fanger observó que aún en las mejores condiciones ambientales, que teóricamente predecirían un voto de sensación térmica neutra (cero, en las escalas de Bedford y ASHRAE), persiste un 5% de personas que sienten incomodidad. Y en la medida que aumenta el valor del PMV, el porcentaje de personas insatisfechas se incrementa. Así, concibió una fórmula para establecer el porcentaje de insatisfacción implícito en el voto de confort calculado:

$$PPD = 100 - 95 \exp^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde:

PPD Porcentaje predicho de Insatisfechos
PMV Voto Medio predicho, adimensional
exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Fuente: (ISO, 2005b)

En la figura 3.4 se muestra la gráfica resultante de la fórmula del PPD de Fanger. Puede apreciarse cómo el vértice de la curva no llega al 0% de insatisfacción, pues incorpora esa valoración subjetiva que hace que incluso en esas condiciones supuestamente óptimas haya quien aduce incomodidad. También se puede observar que el umbral de confort definido por Fanger, limitado por los votos de la escala de Bedford, entre “confortablemente frío” (-1) y “confortablemente cálido” (+1), implica aproximadamente 27% de personas insatisfechas, y por ende, satisfacción sólo en el 73% de la población. Por ese motivo suelen considerarse como umbrales de confort más confiables, los que comprenden 90%

(entre los votos +0.5 y -0.5 de la escala) y 80% (aproximadamente entre los votos +0.84 y -0.84) de aceptación prevista.

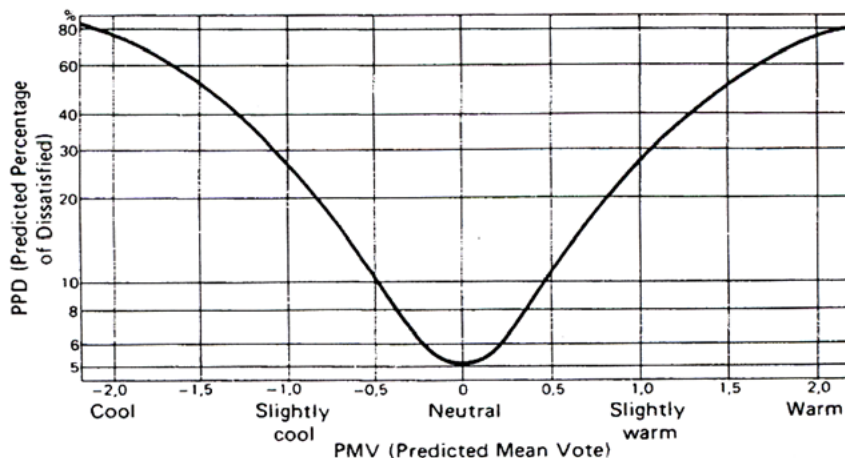


Figura 3.4. Relación entre el PMV y el PPD de Fanger.

Fuente: Auliciems y Szokolay (2007, pág. 35)

Los planteamientos de Fanger fueron la base para el desarrollo de otras propuestas teóricas como el modelo de dos nodos o “2-Node”, planteado en los Laboratorios J.B. Pierce por Gagge, Stolwijk y Nishi (1971). El modelo visualiza al cuerpo humano como un conjunto de dos cilindros concéntricos, uno central y otro periférico y delgado, a manera de piel, a través de los cuales transita el flujo de calor. La vestimenta y el sudor son supuestos como distribuidos uniformemente sobre la superficie del cilindro externo que se expone a un ambiente uniforme. En este sistema hipotético, y conforme a la explicación de Fanger, la temperatura de la piel es un buen indicador de la sensación de confort térmico para sujetos en ambientes fríos. En cambio, la humedad de la piel lo es para sujetos en ambientes cálidos donde el sudor es un fenómeno más observable que los cambios de temperatura epidérmica (Gómez-Azpeitia, Bojórquez, & Ruiz, 2007, pág. 47).

Los estándares PMV y PPD han dado lugar a normas internacionales de amplia aceptación, como la ISO 7730, desde su versión 1984 (ISO, 2005b),⁴² y la ASHRAE 55, desde la versión 1992 (ANSI/ASHRAE, 2021).

Enfoque adaptativo

No obstante el éxito alcanzado por los planteamientos de Fanger y sus derivados, empezaron a observarse discrepancias entre las “predicciones” calculadas por el PMV y los votos reales —en las escalas de Bedford y/o ASHRAE— que expresaban voluntarios encuestados fuera de laboratorios de clima controlado, en lugares comunes como su casa, escuela u oficina, que podían estar incluso sin aire acondicionado ni calefacción, y vestidos de acuerdo a la ocasión (Humphreys M. , 1994). Los estudios de campo se han venido multiplicando desde entonces y por lo tanto las evidencias de la falta de ajuste del PMV con los votos reales de la gente en espacios libremente ventilados, se han robustecido (figura 3.5).

Ante la debilidad del enfoque predictivo al explicar tales discrepancias, surgió la necesidad de formular otro modelo teórico que intentara explicar el fenómeno de la sensación térmica más allá de las reacciones corporales ante el ambiente térmico. Para Michael Humphreys y Fergus Nicol (1998), el *quid* del asunto estriba en que las personas no son entes pasivos que se someten, ante las condiciones del clima, a un balance térmico al que es ajeno su voluntad. Por el contrario, buscan una adaptación a fin de hacer más llevaderas esas circunstancias. En ese caso pueden adaptarse cambiándose de posición (en busca de brisa, por ejemplo), de ropa o incluso ingiriendo una bebida fresca o caliente. Son capaces también de adaptar su entorno abriendo o cerrando ventanas, procurando dispositivos de sombreado, regando agua en el suelo, etc. En consecuencia, la acción de adaptarse va más

42. La revisión hecha en 2015 ratificó el contenido de la versión actualizada en 2005.

allá de un simple balance energético pues implica procesos volitivos que ponen en juego experiencias y expectativas. Por eso se ha dado el nombre de enfoque adaptativo. O, dicho de otra manera, el sujeto es capaz de cambiar las condiciones de la ecuación de Fanger a cada momento en búsqueda de adaptarse al medio.

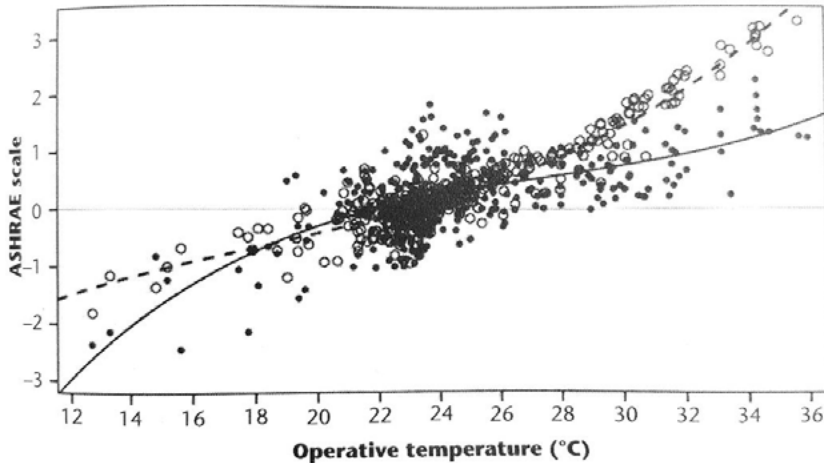


Figura 3.5. Votos reales y PMV contra temperatura operativa media en estudios de campo. Votos reales = círculos huecos, línea punteada; PMV = círculos llenos, línea continua. Fuente: Humphreys, Nicol y Roaf (2016, pág. 111)

Una conclusión de los resultados de estudios de campo emprendidos bajo el enfoque de adaptación es que existe una correlación fuerte entre el régimen normal de temperaturas de un sitio — registradas al exterior— y la temperatura interior a la que la mayoría de las personas expresan voto neutro (Humphreys M., 1978). En la figura 3.6 se muestra la gráfica de dispersión construida por Humphreys, en donde cada punto trazado representa el resultado de un estudio de campo. La abscisa corresponde a las temperaturas exteriores medias mensuales y la ordenada a las temperaturas interiores preferidas. La línea que correlaciona los resultados en edificios climatizados por medios a base de energía

pasiva (círculos llenos), es una recta ascendente (línea A). En contraste, la línea que agrupa a los resultados en otro tipo de edificios, climatizados por medios a base energías activas o mixtos (círculos huecos), es curva y mucho más extendida (línea B).

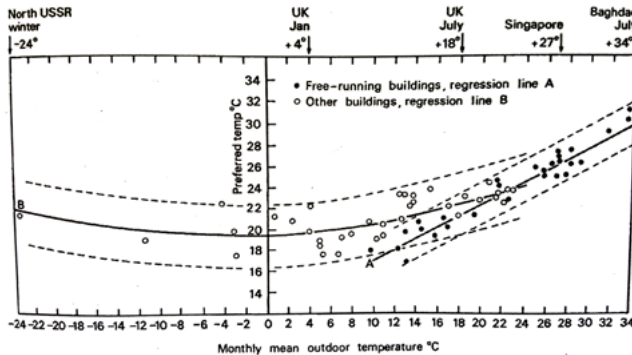


Figura 3.6. Temperaturas neutras y temperaturas exteriores medias mensuales de estudios de campo en diferentes ciudades y climas.

Fuente: Humphreys, Nicol y Roaf (2016, pág. 63)

En la figura 3.6 puede observarse también que la correlación entre las temperaturas preferidas y las temperaturas exteriores medias mensuales presenta un ajuste mayor en el caso de los edificios climatizados con medios pasivos —el intervalo de confianza (líneas punteadas) es más estrecho que en los casos de edificios acondicionados o mixtos—. Humphreys et al. (2016, págs. 62-63) reconocen que aún no se tiene cabal certeza del porqué de esa “excepcionalmente fuerte” correlación ($r = 0.72$), pero plantean que la combinación de las propiedades térmicas de la edificación —que hacen variar el régimen interior en seguimiento a las variaciones de la temperatura exterior— y las prácticas exitosas de adaptación humana —que actúan en correspondencia a esas variaciones percibidas— deben explicar el fenómeno. El caso es que —concluye Humphreys— la temperatura exterior promedio mensual resulta ser el mejor predictor de la temperatura de confort en interiores no acondicionados.

Esa dependencia es uno de los pilares del enfoque adaptativo, y ha sido aceptado en un creciente número de estudios a lo largo del mundo. Como consecuencia, por cada estudio de campo se puede obtener un par de datos importantes: la temperatura neutra (T_n) y la temperatura promedio exterior del sitio (\bar{T}_o) y temporada en que fue realizado el estudio.

Una vez que se fueron conociendo tales resultados en cantidad suficiente, el paso siguiente fue coleccionarlos y someterlos a un metaanálisis⁴³ que pudiera arrojar fórmulas estandarizadas, capaces de predecir las condiciones de confort térmico para cualquier sitio, aunque no hubiera un estudio de campo previo ahí. Los estándares de enfoque adaptativo más importantes que se han publicado, aplicables a edificios climatizados por medios pasivos, son el que se incluye en la norma ASHRAE:55, desde su versión actualizada en 2004 (la más reciente hasta ahora es de 2020), avalado por la ASHRAE (2021) y el Instituto Americano de Normas Nacionales (ANSI)⁴⁴ (ANSI/ASHRAE, 2021), producto del metaanálisis hecho por Richard de Dear y Gail Braguer (1998):

$$T_n = 0.31(\bar{T}_o) + 17.8 \quad \text{Ec. 3.18}$$

donde:

T_n Temperatura operativa neutra, en °C
 \bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Fuente: (Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012, pág. 55)

y el de la norma EN15251 reconocido por la Unión Europea (CEN, 2008) y derivado del metaanálisis realizado por (McCartney & Nicol, 2002):

43. El metaanálisis es un conjunto de herramientas estadísticas cuyo propósito es sintetizar los datos de una colección de estudios diversos e independientes entre sí. La gráfica de la figura 3.6 es resultado de un metaanálisis.

44. Por las siglas en inglés de *American National Standards Institute*.

$$T_{comf} = 0.33(\overline{T_o}) + 18.8 \quad \text{Ec. 3.19}$$

donde:

T_{comf} Temperatura operativa de confort, en °C
 $\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Fuente: (Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012, pág. 57)

Una medida de las diferencias entre las ecuaciones 3.18, 3.19 y 3.20 es la llamada *raíz cuadrada del error cuadrático medio* o *error estándar de estimación* (ESR), que arroja lo siguiente: ESR (3.18 vs 3.19) = 1.6 °C; ESR (3.19 vs 3.20) = 2.0 °C, y ESR (3.18 vs 3.20) = 2.2 °C.

Recientemente se ha realizado un metaanálisis con resultados de estudios de campo hechos en territorio mexicano, que ha dado lugar a un estándar de confort térmico para México, aún sin reconocimiento oficial (Morgan & Gomez-Azpeitia, 2018) ($r^2 = 0.71$) y cuya fórmula para estimar la temperatura operativa neutra es:

$$T_n = 0.51(\overline{T_o}) + 13.07 \quad \text{Ec. 3.20}$$

donde:

T_n Temperatura operativa neutra, en °C
 $\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Fuente: (Morgan & Gomez-Azpeitia, 2018, pág. 604)

Ante la abundante documentación que avala el enfoque adaptativo, especialmente para espacios que carecen de climatización activa, Fanger debió hacer una revisión de sus procedimientos a fin de que el PMV —que por lo regular sobreestima la insatisfacción esperada en ese tipo de espacios—, se ajuste mejor a los votos emitidos en estudios de campo realizados en lugares de clima cálido. Así, propuso afectar el valor del PMV calculado, por un factor que reduce su magnitud de acuerdo al grado de expectativa

que tendrían las personas en función a su habitualidad a sistemas de aire acondicionado (Fanger & Toftum, 2002), como se muestra en la tabla 3.4:

Tabla 3.4. Factor de expectativa a aplicar al PMV, para edificios sin aire acondicionado en climas cálidos. Adaptado de Fanger y Toftum (2002, pág. 93)

Expectativa	Grado de habituación a equipos de clima artificial en la región	Régimen térmico anual	Factor de expectativa, f_e
Alta	Los edificios con climatización artificial son comunes.	Los periodos de calor ocurren en lapsos cortos durante el verano.	0.9 - 1.0
Moderada	Algunos edificios cuentan con climatización artificial pero no constituyen una condición generalizada.	Todo el verano suele ser cálido.	0.7 - 0.9
Baja	Muy pocos edificios operan mediante climatización artificial.	El clima cálido suele ocurrir durante la mayor parte del año.	0.5 - 0.7

Ahora bien, determinar la temperatura neutra para cada sitio según su clima, puede ser de utilidad cuando se deba optar por sistemas de aire acondicionado o calefacción convencional, que generan un ambiente térmico estático, prácticamente invariable. Así, al estimar el volumen de trabajo de tales equipos de climatización a partir de la temperatura neutra adaptativa, habría un ahorro de energía con respecto a si se calculara para operar a los 21 °C que suele estipular el enfoque predictivo, o incluso a la temperatura que resultara de la aplicación del factor de expectativa en el PMV.

Sin embargo, para efectos de sistemas de climatización pasiva se debe tomar en cuenta que las personas están habituadas a ambientes térmicos dinámicos, donde la temperatura puede variar de momento a momento y donde suelen ocurrir brisas esporádicas o periodos de calma en el movimiento del aire. Por eso, lo que determina las características de un diseño con enfoque bioclimático no debe ser la temperatura neutra, sino lo que se denomina rango de temperaturas de confort, entendido como la amplitud de la va-

riación de las temperaturas en que puede permanecer una persona sin percepción de malestar térmico, entre un límite menor y uno mayor claramente diferenciados.

Antes de que Fanger publicara los procesos de cálculo para el PMV y el PPD, algunos autores ya proponían diferentes amplitudes para este rango de confort basados en la aplicación de diversos índices térmicos. Olgyay (1963, pág. 17) propuso una amplitud de 6 K para invierno y de 7 K para verano. Por su parte Givoni (1969, págs. 285-290) coincidió con la amplitud para invierno de Olgyay, pero le dio un grado más a la amplitud para verano, para quedar en 8 K. Con el tiempo, Givoni (1998, págs. 38-39) reformuló su propuesta, sugiriendo una amplitud de 7 K tanto en verano como en invierno, pero sólo para países en desarrollo, es decir, habituados a sistemas de climatización activa. Para países en vías de desarrollo, esto es, no habituados a ambientes térmicos estáticos, incrementó la amplitud en 2 K, para llegar a 9 K.

Las anteriores amplitudes para el rango de confort no estaban determinadas aún por el enfoque adaptativo, por lo que no existe en ellas el concepto de temperatura neutra, sino de límites inferior y superior de confort. No es el caso de los estándares adaptativos de confort térmico, algunos de los cuales han sido avalados por organizaciones nacionales o internacionales. En ellos la determinación del rango de confort consiste en el establecimiento de una temperatura neutra y unos límites equidistantes a ésta. Para determinar esa amplitud se aplican diferentes criterios.

La norma 55 de ASHRAE, coincide con el criterio de Fanger (1970) de considerar los límites que definen el 80% o el 90% de aceptación, y que garantizan estar dentro de los votos de sensación térmica que van de lo ligeramente fresco a lo ligeramente cálido. En su apartado para espacios acondicionados por medios pasivos⁴⁵ (ANSI/ASHRAE, 2021, págs. 12-14) considera un ran-

45. ASHRAE los denomina *Controlled Naturally Conditioned Spaces*.

go de 7 K ($T_n \pm 3.5$ K), con un 80% de aceptación, suficiente para un diseño exitoso.⁴⁶ El cálculo de los límites de confort, son subsidiarios de la ecuación 3.18 y se aplican sólo en caso de que cumpla con las siguientes condiciones:

- En el espacio no se encuentra ningún tipo de climatización mecánica (aire acondicionado, refrigeración, suelo radiante, enfriamiento desecante o calefacción).
- Las personas desarrollan actividades leves, equivalentes a 1.0 a 1.3 *met* de tasa metabólica.
- Las personas son libres de adaptar su vestimenta para ajustarse a las condiciones del ambiente térmico en un rango de 0.5 a 1.0 *clo*.
- La temperatura promedio exterior prevaleciente ($\overline{T_o}$) no debe ser menor a 10 °C ni mayor a 33.5 °C.

Las fórmulas para determinar los rangos de confort para 80% de aceptación, según la norma 55 de ASHRAE son:

$$T_{sup} = 0.31(\overline{T_o}) + 21.3 \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$T_{inf} = 0.31(\overline{T_o}) + 14.3 \quad \text{Ec. 3.22}$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

$\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2021, págs. 20-21)

Por su parte la norma europea EN15251 (CEN, 2008, págs. 13, 28) organiza las demandas de confort térmico de acuerdo a

46. ASHRAE incluye el rango de confort para un 90% de aceptación: 5 K ($T_n \pm 2.5$ K), pero sólo para fines informativos.

cuatro categorías de expectativa, de las cuales sólo las tres primeras tienen una aplicabilidad práctica. La categoría I corresponde a un alto nivel de expectativa aplicable a espacios que albergan personas con requerimientos especiales o muy sensibles y frágiles al ambiente térmico con una amplitud del rango de confort de 4 K. La categoría II corresponde a un nivel de expectativa promedio con una amplitud de 6 K recomendada para el diseño de edificios nuevos. La categoría III es de expectativa moderada con una amplitud de 8 K y aplicable a la renovación de edificios.

Las fórmulas que determinan los rangos de confort para espacios categoría II sin aire acondicionado o cualquier otro sistema de enfriamiento mecánico según la norma EN15251, son:

$$T_{sup} = 0.33(\overline{T_o}) + 18.8 + 3 \quad \text{Ec. 3.23}$$

$$T_{inf} = 0.33(\overline{T_o}) + 18.8 - 3 \quad \text{Ec. 3.24}$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

$\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Fuente: (CEN, 2008, pág. 28)

Un criterio diferente para determinar la amplitud del rango de confort fue desarrollado por Canul-Euan et. al (2018), basado en que si la dependencia de la T_n a la $\overline{T_o}$ es uno de los pilares fundamentales del enfoque adaptativo, algo similar debe ocurrir respecto de la amplitud del rango de confort (RC) con respecto a la oscilación promedio de temperaturas externas ($\overline{TS_o}$) a la que se someten y habitan las personas de un determinado lugar. Su hipótesis se resume en que, a mayor oscilación de temperaturas

externas, mayor la amplitud del rango de temperaturas a las que las personas pueden adaptarse y sentirse cómodas. Como resultado del metaanálisis efectuado con los resultados de estudios de campo llevados a cabo en México (y que también sirvieron para proponer la ecuación 3.20) proponen delimitar el rango de confort conforme a la siguiente fórmula (con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.44$):⁴⁷

$$RC = 0.0088(\overline{TS_o})^2 + 0.0899(\overline{TS_o}) + 3.584 \quad \text{Ec. 3.25}$$

donde:

$\frac{RC}{TS_o}$ Rango de confort, en K
 $\overline{TS_o}$ Oscilación o amplitud térmica exterior promedio (mensual o estacional), en K

Fuente: (Canul-Euán, Gómez-Azpeitia, & Bojórquez-Morales, 2018, pág. 1132)

$$TS_o = \overline{T_{max_o}} - \overline{T_{min_o}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

donde:

$\overline{T_{max_o}}$ Temperatura máxima exterior (promedio mensual o estacional), en °C
 $\overline{T_{min_o}}$ Temperatura mínima exterior (promedio mensual o estacional), en °C

En algunos climas, en donde se presentan condiciones de temperatura extrema, ya sea muy calurosas o demasiado frías, ocurren situaciones especiales en las que los límites estimados del rango de confort no coinciden con la sensación térmica de las personas. En el caso de periodos muy calurosos, por ejemplo, algunas condiciones de temperatura que se localizan por abajo del límite inferior de confort, (en horas cercanas al amanecer) no propician sensación de frío ni ameritan acciones de calefacción alguna. De cierta forma, es como si se ampliara el rango de confort hacia abajo, hasta cierto límite.

47. Este estándar carece aún de reconocimiento oficial.

De igual forma, en temporadas muy frías, algunas condiciones de temperatura por encima del límite superior de confort (en horas cercanas al medio día), no ocasionan sensación de sobrecalentamiento ni demandan acciones de refrigeración. En este caso, el rango de confort parece ampliarse hacia arriba, también hasta cierto límite.

Tales límites podrían determinarse mediante temperaturas base aún bajo el enfoque adaptativo, como lo hace Givoni (1998) para la zona de confort de su carta bioclimática o Szokolay (2008, págs. 32-33 y 129) para el cálculo de las Horas-Grado (Kh) de calefacción definidas como el déficit de temperatura acumulativo por abajo de la temperatura base establecida (T_b), multiplicado por su duración.⁴⁸ En este contexto, las temperaturas base determinadas para el cálculo de las Kh, podrían ser consideradas como los límites extremos de confort.

Givoni propone una T_b inferior a 20 °C para los periodos cálidos y de 18 °C para los periodos neutros o fríos, y una T_b superior definida por un rango de confort (RC) de 9 K para los lugares donde no es habitual el uso del aire acondicionado en los periodos cálidos y de 7 K para el resto de las situaciones. Así, la T_b superior se despeja agregando el RC la T_b inferior según corresponda.

Szokolay a su vez plantea que la T_b para las temporadas en extremo calurosas, en donde no se registran temperaturas realmente frías, puede establecerse en 18 °C, aun cuando el límite inferior del rango de confort esté por encima de esa temperatura. De esta manera se amplía dicho rango hacia abajo.

Como conclusiones de la revisión hecha a los enfoques teóricos sobre el confort térmico, se puede decir que el enfoque ana-

48. El procedimiento es útil para estimar el consumo de energía requerido para enfriamiento o calefacción anual o mensual, el cual se obtiene de multiplicar los Kh del periodo (ya sea de enfriamiento o calefacción), por la conductancia del edificio o qc (tasa de pérdida de calor específica).

lítico es el que mejor explica el fenómeno en sistemas estáticos, en donde el clima es controlado con medios mecánicos —lo que implica altos consumos de energía—, por lo que el PMV y PPD son estándares útiles para el diseño de espacios que contengan equipos de aire acondicionado o calefacción. Por su parte, el modelo adaptativo interpreta mejor el fenómeno en sistemas dinámicos, sometidos a la variabilidad del clima local, por lo que los estándares adaptativos para determinar la temperatura neutra y su respectivo rango de confort en función de las características del clima local, son especialmente útiles para el diseño de espacios con criterio bioclimático, esto es, que controlan el clima mediante el uso de energías pasivas (dejando pasar o bloqueando el sol, el viento o la humedad y aprovechando el desempeño termodinámico de los materiales y los sistemas constructivos), energías activas limpias (electricidad fotovoltaica o eólica), y con la participación activa de los habitantes.

Estas modalidades de la energía son menos poderosas que las energías activas convencionales, pero al plantear como meta temperaturas neutras y rangos de confort de origen adaptativo, en vez de los puntos de ajuste de supuesta aplicación “universal” de origen analítico, la tarea de adaptación necesaria se reduce y hace más fácil alcanzar el desempeño deseado. En este esquema, el uso de energías activas convencionales debe quedar sólo como la última alternativa a usar, por lo que la huella de carbono del espacio proyectado puede tender a cero. De esta forma el confort térmico entendido bajo el modelo adaptativo sirve no sólo para gestionar la interfaz de habitabilidad térmica de la arquitectura, sino también la parte de su interfaz de sostenibilidad en lo que atañe a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y la amenaza del calentamiento global.

3.3.4 Cartas bioclimáticas

La mayoría de los conocimientos técnicos que se exponen en el capítulo 2 (ampliamente usados por climatólogos) y los que anteceden a este punto en el capítulo 3 (manejados por fisiólogos, ingenieros, físicos y bioclimatólogos, expertos en confort térmico) estuvieron por mucho tiempo alejados del ámbito profesional de arquitectos, diseñadores y urbanistas. De hecho, no es sencillo tratar de aplicar fórmulas, conceptos o procedimientos como los revisados hasta aquí, directamente a un proyecto. Era necesario contar con una herramienta que pudiera convertir las largas listas de datos climáticos o los complejos índices y estándares térmicos en insumos prácticos para el diseño.

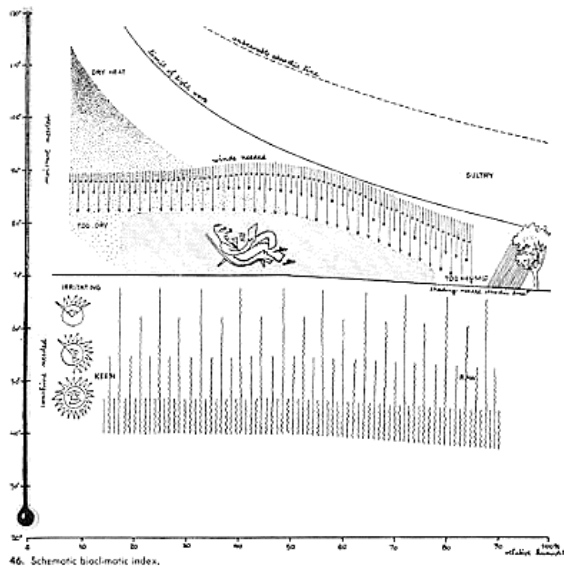


Figura 3.7. Carta bioclimática de Olgay. Explicación esquemática.

Fuente: Olgay (1963, pág. 23).

Eso fue lo que logró el arquitecto y académico de la Universidad de Princeton, Víctor Olgay en lo que se considera el documento fundacional de la disciplina conocida como bioclimática, el

libro *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism* (Olgay, 1963). Su importancia radica no sólo por su método de sistematización e integración de contenidos muy diversos, provenientes de disciplinas distantes de la arquitectura convencional, sino sobre todo en la síntesis que logró, a partir de ellos, en una herramienta, sencilla, práctica y fácil de usar, que llamó “carta bioclimática” (figura 3.7).

La carta consiste en un diagrama cartesiano que permite correlacionar dos variables. En el caso de la carta bioclimática de Olgay el eje de las abscisas (X) corresponde a la variable de humedad relativa y el eje de las ordenadas (Y) a la variable de temperatura del aire. Así, es posible ubicar en el gráfico pares de datos humedad-temperatura que corresponden a un determinado momento de algún sitio, en forma de puntos. Una vez graficados los puntos se puede observar en qué parte de la “carta” quedan inscritos (figura 3.8).

La carta sintetiza la información en cuatro zonas:

1. Zona de confort (ZC), delimitada como un polígono de aristas curvadas, ubicado al centro del gráfico. Si los puntos quedan inscritos ahí, se interpreta que ninguna acción de climatización es necesaria. La ZC se delimitó en términos del índice *TE* (ver sección 3.3.2)
2. Zona de calentamiento solar pasivo, localizada por debajo de la ZC y graduada mediante líneas que indican la intensidad de calentamiento necesario (expresado en Wh/m^2) para recuperar el confort en situaciones de frío. En el caso de que los puntos queden inscritos en este gradiente, es posible determinar la magnitud de exposición al sol que se requiere durante esas condiciones.
3. Zona de ventilación, localizada por encima de la ZC y graduada mediante líneas que indican la velocidad del viento requerida para enfriar y así recuperar el confort en perio-

dos de calor. Cuando los puntos coinciden con esta franja graduada, resulta sencillo determinar la magnitud de la ventilación necesaria que se debe propiciar en esas condiciones.

4. Zona de humidificación, localizada por encima a la izquierda de la ZC y graduada mediante líneas que indican la cantidad de agua que es necesario incorporar al aire a fin de enfriar y humidificar el ambiente y así recuperar el confort en periodos de calor seco. Cuando los puntos se enmarcan en esta región de la carta, es sencillo entender que se deben disponer de fuentes de agua en la cercanía de las personas durante esas condiciones.

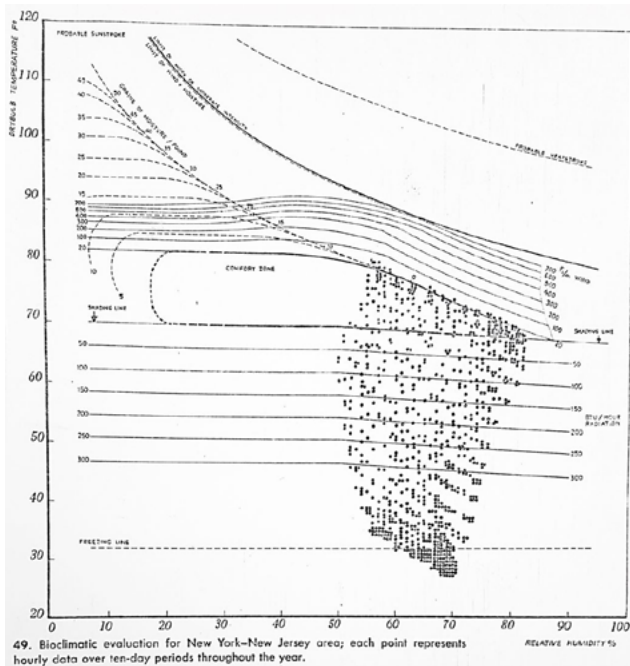


Figura 3.8. Evaluación del área New York-New Jersey en la Carta Bioclimática de Olgay. Cada punto representa datos horarios de cada diez días a lo largo del año. Fuente: Olgay (1963, pág. 26).

De esta forma, se facilitó la interpretación de los datos climáticos del sitio en términos de requerimientos de climatización, alcanzables mediante estrategias de diseño, en función de las demandas que plantea la termorregulación —y adaptación— de las personas (figura 3.8).

A la carta bioclimática de Olgyay pronto se le hicieron observaciones que dieron lugar a propuestas más refinadas. Destaca sobre todo la Carta Bioclimática para Edificios (BBCC por sus siglas en inglés) hecha por Givoni en otro libro fundamental para la bioclimática: *Man, Climate and Architecture* (Givoni B. , 1969). Ahí, una de las debilidades que Givoni señala respecto del método propuesto por Olgyay, es que no toma en cuenta los efectos del edificio sobre el microclima interior, por lo que resulta aplicable sólo para condiciones exteriores, donde incide la radiación solar, el viento y la humedad exclusivamente. En consecuencia, propuso su propia carta con dos innovaciones relevantes (Givoni B. , 1969, págs. 285-290):

- La primera consiste en que los pares de datos temperatura-humedad no se insertan sobre un gráfico de doble entrada común sino en un diagrama psicrométrico que representa mejor la relación física entre las variables que caracterizan la mezcla aire-vapor de agua de la atmósfera. Involucra, además de la temperatura del aire (T) en °C (sobre el eje de las X) y la humedad relativa (H_R) en % (representada por las líneas curvas), la temperatura de bulbo húmedo (T_w) en °C (expresada en las líneas inclinadas) y la presión de vapor (e) en mm Hg (en el eje de las Y) (figura 3.9).
- La segunda innovación de Givoni consiste en incorporar a las estrategias de climatización originales de Olgyay (radiación solar, ventilación y humidificación), estrategias propias del desempeño térmico de los edificios y de dispo-

sitivos de climatización, tales como la inercia térmica y el enfriamiento nocturno.

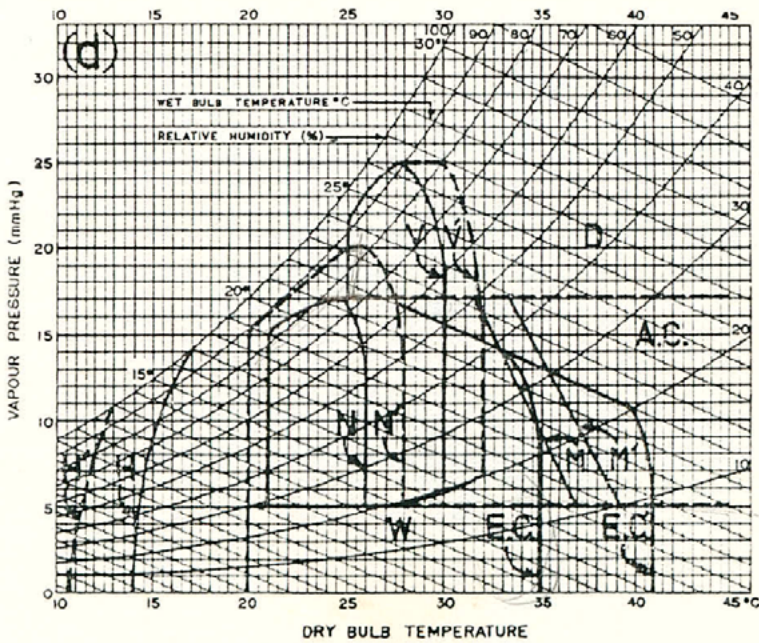


Figura 3.9. Carta Bioclimática para Edificios (BBCC) de Givoni.
Fuente: (Givoni B. , Man, Climate and Architecture, 1969, pág. 287).

La mecánica funcional de la BBCC es la misma que en la carta de Olgyay; se grafican los datos de temperatura-humedad y de acuerdo con la zona en donde quedan inscritos es el diagnóstico que les corresponde.

Así, la BBCC de Givoni se compone de siete zonas (figura 3.9):

1. Zona de confort (ZC), delimitada como un polígono de aristas rectas y curvadas, identificado con la letra N para individuos aclimatados en actividades sedentarias (las zonas con apóstrofe —en este caso N'— indican el margen máximo de condiciones permisibles que pudiera alcanzarse

cuando el edificio contempla aislamiento térmico y otros atributos propios de la bioclimática). Los límites fueron determinados mediante el índice TSI (ver sección 3.3.2).

2. Zona de masa térmica (M y M') a la derecha de la ZC, representa las condiciones en que podría ampliarse la ZC mediante el efecto de la inercia térmica de la edificación aún en ausencia de ventilación. La inercia es consecuencia de la masa térmica que puede determinarse mediante el ajuste conveniente de las propiedades térmicas de los materiales y las dimensiones —especialmente el espesor— de los elementos constructivos.
3. Zona de ventilación (V y V') a la derecha y encima de la ZC, indica las condiciones que pueden controlarse mediante el aprovechamiento del movimiento del aire.
4. Zona de enfriamiento evaporativo (EC y EC') localizada a la derecha de la ZC, se traslapa en parte con la zona M, pero se extiende aún por debajo de ella. Indica las condiciones que podrían manejarse mediante la humidificación del aire, que por efecto de la evaporación hacen que pierda calor. Esta estrategia de climatización puede resolver con medios pasivos (corrientes de aire que pasan por fuentes, espejos de agua, vegetación, etc.) o activos (equipos mecánicos de enfriamiento evaporativo directo, mejor conocidos como *coolers*, o de enfriamiento evaporativo indirecto que enfrían el aire sin ponerlo en contacto con el agua).
5. Zona de humidificación (W) ubicada por debajo de la ZC, pero con un límite a la derecha igual al de la zona EC. Representa las condiciones que requieren un suministro extra de humedad para evitar irritación de la piel y mucosas del cuerpo. Se puede lograr con medios pasivos (los mismos que para EC) y activos, como atomizadores o nebulizadores eléctricos.

6. Zona de aire acondicionado (AC) que comprende una extensa área a la derecha de los límites de trabajo de la ventilación, la inercia térmica y la evaporación, sólo es posible atenderla mediante enfriamiento mecánico o equipos de aire acondicionado.
7. Zona de calentamiento (H y H') a la izquierda de la ZC. Se trata también de un efecto derivado de la masa térmica de la edificación, que desencadena un desfase entre el momento de mayor radiación solar en el exterior y el momento en que se requiere el mayor calentamiento al interior, por lo regular en la noche y madrugada cuando aún no sale el sol. Condiciones situadas más allá del borde H' requieren calefacción activa convencional.

En 1998, Givoni publicó una BBCC actualizada (figura 3.10) mediante la incorporación de otros medios de climatización pasiva, como la re-radiación nocturna o el enfriamiento convectivo nocturno. El primero consiste en que la radiación emitida por los objetos de la superficie terrestre escapa hacia la atmósfera y, si hay poca nubosidad, en gran parte puede salir hacia el espacio. El segundo, que la superficie terrestre calienta al aire de sus inmediaciones y al disminuir la densidad de ese aire se generan burbujas relativamente calientes que se elevan transportando calor, proceso conocido como convección. Estas modalidades de enfriamiento requieren de condiciones de cielo despejado, baja humedad atmosférica y ventanas abiertas. También sustituyó la variable presión de vapor e en el eje de las ordenadas (Y) por la razón de mezcla r_w (*moisture content*, en inglés), como ya se dijo, medida en gramos de agua por kg de aire seco. Asimismo, dejó de considerar dos polígonos diferentes para edificios convencionales o apropiados, pero los siguió considerando, asumiendo los principios del enfoque adaptativo, para temporada de verano o invierno y para poblaciones de países desarrollados o en vías de desarrollo,

es decir con poblaciones habituadas o no a la climatización mecánica (Givoni B. , 1998, págs. 36-45).

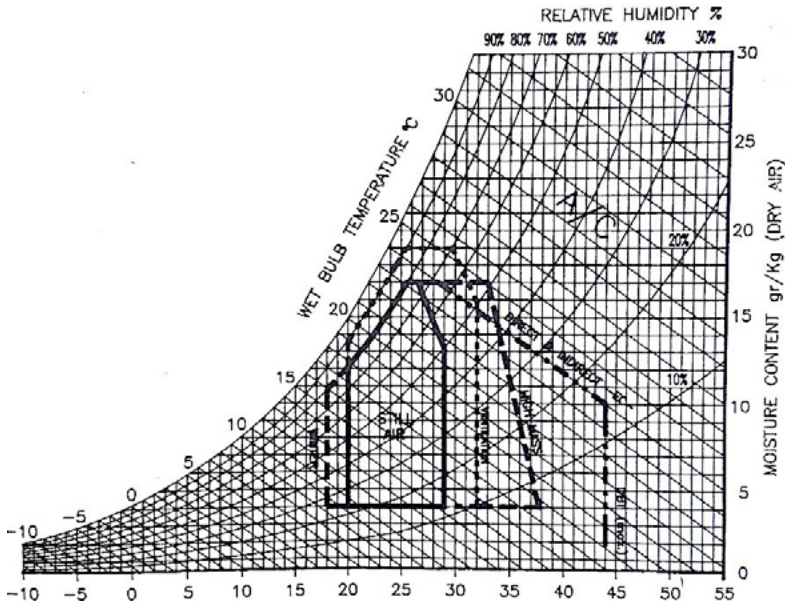


Figura 3.10. Estrategias de enfriamiento pasivo y sus límites, para países no desarrollados de clima cálido. Fuente: (Givoni B. , 1998, pág. 45).

A partir de las innovaciones de Givoni, las propuestas de cartas bioclimáticas con mayor influencia en estándares nacionales o internacionales, así como en software especializado en diseño con enfoque bioclimático, se plasman en diagramas psicrométricos y consideran prácticamente las mismas estrategias de climatización, pasivas y activas, que la BBCC.

Es el caso de la carta bioclimática que se describe en el libro *Introduction to Architecture Science. The basis of sustainable design*, de Steve V. Szokolay (2008, págs. 123-125), aunque se debe hacer la advertencia que a la variable asignada al eje de ordenadas (Y) la denomina erróneamente “humedad absoluta”⁴⁹ pues su unidad

49. La humedad absoluta, también llamada densidad del vapor (p_w) expresa la relación de gramos de vapor por unidad de volumen, no de masa, por lo tanto su unidad

de medida es g/kg, por lo que en realidad se trata de humedad específica (q , gramos de vapor por cada kilogramo de aire “húmedo”). Ahora bien, en términos prácticos la humedad absoluta ρ_w , la humedad específica q y la razón de mezcla r_w (gramos de vapor por cada kilogramo de aire seco) discrepan por muy poco de modo que para valores comunes en los espacios habitados pueden considerarse equivalentes entre sí. Un elemento innovador de esta carta es que se auxilia del índice SET para definir los límites de su ZC (véase sección 3.3.2). Incluye, como estrategias de climatización pasiva:

- Calentamiento por ganancia solar directa e indirecta;
- Enfriamiento evaporativo directo e indirecto;
- Enfriamiento por ventilación;
- Enfriamiento por re-radiación nocturna; y
- Amortiguamiento de la oscilación térmica e incremento del retraso térmico mediante la incorporación de masa térmica al edificio (figura 3.11).

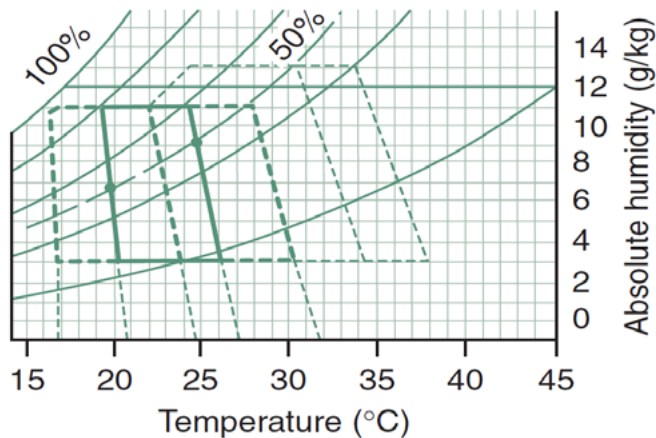


Figura 3.11. Carta bioclimática de Szokolay con la zona de confort y los polígonos de masa térmica. Obsérvese que la variable sobre el eje de las ordenadas (Y) corresponde en realidad a la humedad específica (g/kg).

Fuente: Szokolay (2008, pág. 124).

de medida más usual es g/m³ (ver sección 2.3.4).

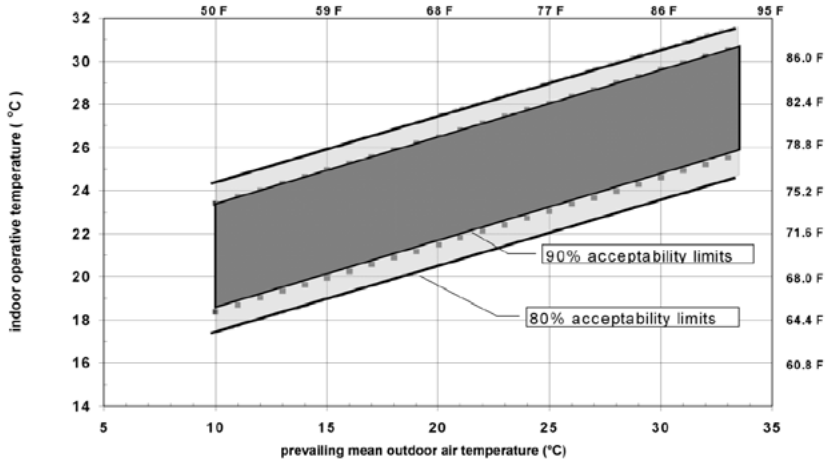
En la norma 55 de ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 12) se incluye una carta de confort basada en el PMV y el PPD, y por lo tanto aplicable sólo para espacios acondicionados. Está resuelta sobre un diagrama psicrométrico con dos ZC, una para personas vestidas con 0.65 *clo* y otra para quienes visten 1.0 *clo*, cuyos límites se basan en el índice SET en función de la velocidad del aire (v).

Para espacios con ventilación natural ASHRAE propone una carta de evaluación de confort con características totalmente diferentes (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 20). No se construye sobre un diagrama psicrométrico sino sobre una gráfica de doble entrada. No funciona para decidir estrategias de climatización para proyectos, sino para evaluar el desempeño térmico de edificios construidos (mediante medición física del régimen térmico interior) o en proyecto (mediante simulación digital de su desempeño térmico). En el eje de las X se inscribe la variable de temperatura exterior promedio (mensual o estacional), y en el de las Y la temperatura operativa interior, ambas en °C. Ahí se grafican las ecuaciones que representan los límites superior e inferior del rango de confort, tanto para 80% (ecuaciones 21 y 22) como para 90% de aceptación ($RC = \pm 2.5 K$). La mecánica de diagnóstico consiste en insertar los pares de datos temperatura operativa medida (o simulada) y temperatura promedio exterior. Si los puntos coinciden dentro de la banda definida por los límites de confort, no es necesario emprender tareas de adaptación. Si se ubican fuera de la banda, entonces se requieren estrategias de enfriamiento (si quedan por encima de la banda) o de calentamiento (si quedan por abajo), pero no sugiere cuáles pueden ser (figura 3.12.a).

Este mismo modelo de carta de evaluación es la que incluyó la norma europea EN 15251 (CEN, 2008, págs. 27-29), en donde los límites del rango de confort correspondían a las categorías de edificios consideradas en la norma (I, II o III) y definidas median-

te las ecuaciones respectivas (las ecuaciones 3.23 y 3.24 aplican para edificios tipo II) (figura 3.12.b).

a.



b.

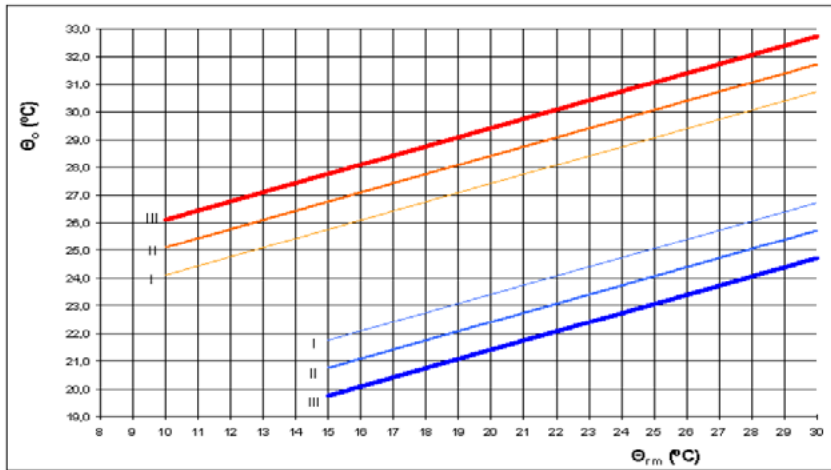


Figura 3.12. Rangos de temperatura operativa aceptable para espacios libremente ventilados.

a. Norma 55 de ASHRAE. Fuente: (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 20)

b. Norma EN 15251. Fuente: (CEN, 2008, pág. 27)

Una peculiar estructura de carta bioclimática, la ha venido desarrollando John Martin Evans (Evans & Schiller, 1994). Se le conoce como “Triángulos de Confort” y se basa tanto en los antecedentes de Olgay y Givoni como en las *Tablas de Mahoney* (Koenigsberger, Mahoney, & Evans, 1970), instrumento de diagnóstico y guía para el diseño con enfoque bioclimático que la Asociación Internacional de Fomento del Banco Mundial encargó para apoyo de poblaciones marginadas en África (se verá con más detalle en la sección 4.1 de este libro). Al paso de los años, la propuesta de Evans se ha ajustado a estándares como el PMV y al adaptativo de la norma 55 de ASHRAE.

Su originalidad radica en que la carta se traza sobre un diagrama de doble entrada, como el empleado por Olgay, pero sin excluir a la humedad. Givoni tuvo el acierto de identificar que la reducción potencial de la temperatura interior respecto de la exterior se incrementa con la amplitud de la oscilación de temperaturas exteriores, y ésta es inversamente proporcional al contenido de humedad en el aire, expresado por la presión de vapor (e), fenómeno que no se puede explicar con la humedad relativa exclusivamente (Givoni B. , 1969, pág. 285). Por eso Givoni incorporó la e a su BBCC. Evans hace el proceso inverso. En vez de incorporar a la carta la variable de e , integra la oscilación térmica (\overline{TS}_o) que lleva implícita toda la dinámica higrúica de la mezcla de aire seco y vapor de agua (Evans, 2007, pág. 94).

Así, los triángulos de confort de Evans tienen a la temperatura promedio exterior (mensual o estacional, \overline{T}_o) en las abscisas y en las ordenadas a la oscilación promedio de temperaturas externas (\overline{TS}_o). En ese espacio se trazan con apoyo de diversos índices térmicos, una serie de polígonos (por lo regular triángulos truncados) que determinan las condiciones de confort en diferentes circunstancias: actividades sedentarias, reposo nocturno y tránsito en circulaciones interiores o exteriores. La base del triángulo

coincide con un valor nulo de \overline{TS}_o y su longitud (en términos de \overline{T}_o) varía en función de los requerimientos que demanda la tasa metabólica por actividad (para actividades sedentarias va de 18 °C a 28 °C). Así, al aumentar la \overline{TS}_o la amplitud del rango de confort se va reduciendo hasta un valor máximo de $\overline{TS}_o = 8$ K (figura 3.13 triángulo A)

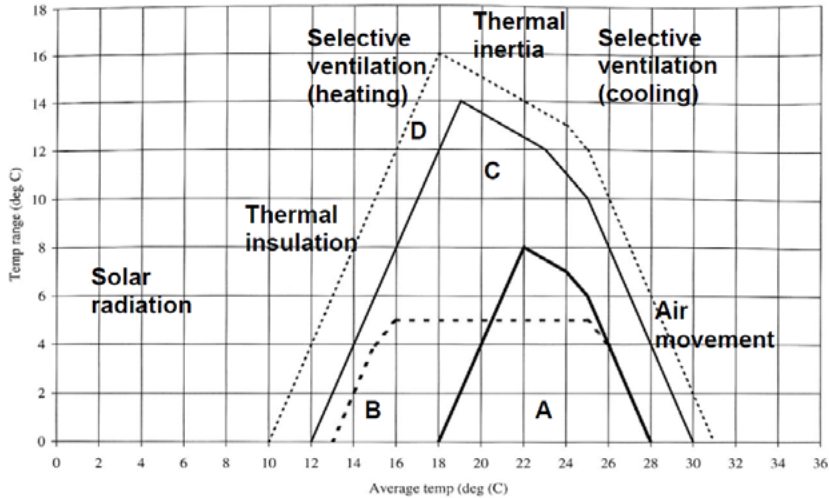


Figura 3.13. Triángulos de confort y estrategias de diseño con enfoque bioclimático. A = Zona de confort para actividades sedentarias
 B = Zona de confort para reposo nocturno C= Zona de confort para áreas de tránsito al interior D = Zona de confort para áreas de tránsito al exterior
 Fuente: (Evans, 2003).

La silueta de los triángulos de confort ha ido variando con el tiempo, en aras de hacer más preciso su ajuste con respecto a factores de arropamiento y a los estándares de confort vigentes (Evans, 2007, págs. 108-111). Para efectos del enfoque adaptativo contenido en la norma 55 de ASHRAE, Evans (2007) encuentra que el triángulo de confort con base = 10 K de \overline{T}_o (de 18 °C a 28 °C) y altura = 8 K de \overline{TS}_o , y la silueta que se aprecia en la figura 3.14.b, coincide en su totalidad con las zonas de confort

de ASHRAE correspondientes a las condiciones de \bar{T}_o promedio entre 10 °C y 20 °C, y parcialmente a las correspondientes a condiciones de \bar{T}_o promedio de 5 °C y de 25 °C a 35 °C, con lo que considera apropiado el uso de los triángulos de confort para edificios libremente ventilados cuya temperatura promedio está entre 10 °C y 24 °C, aunque su base permanezca fija. Desalienta, por lo tanto, la aplicación de la herramienta para climas extremos con temperatura promedio inferiores a 10 °C y mayores a 25 °C (Evans, 2007, pág. 110). Sin embargo, podría funcionar para las condiciones más cálidas sólo con desplazar el triángulo hacia la derecha 2 K.

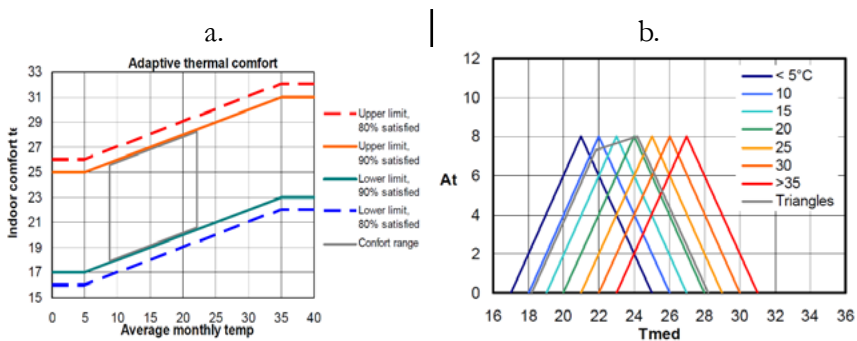


Figura 3.14. Triángulos de confort y su ajuste a la norma 55 de ASHRAE para edificios libremente ventilados. a = Rangos de confort según la norma 55 de ASHRAE (en gris las condiciones contenidas en el triángulo de confort para actividades sedentarias) b = Triángulo de confort y rangos de confort de ASHRAE Fuente: (Evans, 2007, pág. 110)

La mecánica de usos de los Triángulos de Confort de Evans es igual que el de las otras cartas bioclimáticas. Se trazan los puntos correspondientes a los pares de datos temperatura exterior promedio-oscilación de temperaturas promedio de cada lugar y, según el polígono en que queden inscritas, corresponde la evaluación y/o sugerencia de medios de climatización pasiva a aplicar.

Todas estas herramientas, sustentadas en estudios empíricos pero fáciles de aplicar en el proceso de proyección arquitectónica

por su naturaleza visual (son diagramas, no series de números), dieron lugar a un desarrollo acelerado de lo que en su momento se denominó *arquitectura bioclimática*, misma que pronto empezó a confundirse como una “tendencia” más de la arquitectura contemporánea. Por ello Sergio Los (1983) advirtió que la arquitectura bioclimática no debía ser presentada como un movimiento o una de las muchas modas que animan el contexto cultural de la arquitectura. Para él, la buena arquitectura siempre ha sido bioclimática y una arquitectura no bioclimática carece de calidad.

En la actualidad, si bien en algunos arquitectos subsiste la idea de “moda”, la bioclimática es ya una disciplina tecnificada. Son numerosas las aplicaciones informáticas disponibles que apoyan a los arquitectos, urbanistas, diseñadores e ingenieros en esta materia. Algunas de esas aplicaciones están incrustadas en plataformas más amplias de diseño utilizadas masivamente. Junto a esa disponibilidad de herramientas técnicas se ha observado también su aplicación en proyectos reales por parte de un número creciente de arquitectos de todo el mundo, incluso por algunos de los más célebres y galardonados⁵⁰. Con ello ha quedado zanjada la brecha que hubo en un principio, entre los ejemplos académicos de arquitectura con aportaciones de la bioclimática, construidos como laboratorio en universidades, y la arquitectura que se proyecta, se construye, se vende y se habita en la realidad.

3.4. El rol del habitante

No obstante la confianza que dan las herramientas de diagnóstico bioclimático y que el buen desempeño de estrategias, sistemas y dispositivos de climatización pasiva es una certeza demostrada en estudios de laboratorio y campo, el factor decisivo para que el diseño de un espacio habitable propicie buenas condiciones de comfort térmico una vez construido y habitado, estriba mayormente

50. Norman Foster, Renzo Piano, Glenn Murcutt, Alejandro Aravena, Diébedo Francis Kéré, por citar sólo algunos ganadores del Premio Pritzker.

en el comportamiento de sus habitantes. Aún el mejor proyecto bioclimático, el más cuidado y calculado con herramientas científicas, el construido con el más cuidadoso enfoque sostenible, puede resultar en un dispendio energético si el habitante no procede de una manera proactiva. De hecho, el edificio no consume energía, es la gente quien lo hace (Janda, 2011).

Esto tiene que ver con la manera en que las personas interactúan con su entorno natural, y que (Gardner, 1999) ha denominado “inteligencia naturalista”. En el contexto en que abordamos el presente capítulo, se trataría más bien de una expansión más allá del ambiente natural, y se definiría como la capacidad de comunicarse con el entorno que se habita, natural o antropogénico ya sea urbano o arquitectónico. En esto, como en las otras inteligencias específicas identificadas por Gardner⁵¹, las personas actúan en una enorme gama de comportamientos que pueden ir de un desempeño deficiente a uno sobresaliente.

Desde principios de este siglo, Baruch Givoni junto con académicos de Brasil (Givoni & Vecchia, 2001); (Krüger & Givoni, 2004) se dieron a la tarea de establecer modelos que pudieran predecir el efecto de la ocupación humana en el ambiente térmico de los edificios. Asimismo, en Colima, México, se encontró, en el marco de una investigación sobre violencia doméstica y arquitectura (Gómez-Azpeitia, 2011), que la correlación entre la oscilación de temperaturas medidas al interior de una vivienda (\overline{TS}_i) y el tipo de convivencia social registrado en ella, es más fuerte ($r^2 = 0.63$) que respecto de las propiedades térmicas de la envolvente arquitectónica ($r^2 = 0.36$).⁵² Las fórmulas desarrolladas por Givoni,

51. Las inteligencias o destrezas múltiples que identifica Gardner son: verbal-lingüística, lógica-matemática, visual-espacial, musical, corporal-cinestésica, interpersonal, intrapersonal y naturalística.

52. Los tipos de convivencia considerados fueron: 0 = sin violencia, 1 = violencia psicológica, 2 = intimidación, 3 = violencia física y 4 = violencia sexual. Las propiedades térmicas de la vivienda se establecieron mediante la suma del producto UA de cada cerramiento, el cual se compone del factor de transmitancia térmica U-value en

Krüger y Vecchio confirmaron tales diferencias (Gómez-Azpeitia, Givoni, Alcántara, & Barragán, 2005, págs. 248-249).

La variabilidad casi infinita de posibles maniobras que los habitantes pueden accionar y que a la postre desencadenan efectos en el régimen térmico de los espacios habitables, es uno de los factores que originan inexactitud en los resultados de simulación térmica de los softwares especializados, incluso de los de más alto rendimiento como *Energy Plus* (U.S. Department of Energy, 2020) o *Transient System Simulation Tool* (TRNSYS, 2019). Una de esas posibles maniobras, quizás la más notoria, es el control de ventanas. La dinámica de cómo los habitantes interactúan con sus ventanas, porqué y cuándo, ha sido el objetivo de diversos estudios realizados en diferentes ciudades y climas. Primero mediante toma de fotografías a intervalos regulares y más recientemente con sensores automáticos de movimiento y posición colocados en las ventanas.

Borgeson y Braguer (2008, págs. 8-9) hicieron una revisión de los modelos emanados de ocho estudios desarrollados entre 1984 y 2008, en Reino Unido, Suiza, Estados Unidos, Pakistán y Alemania, en edificios de oficinas, tanto libremente ventilados como con sistemas mecánicos de climatización. La intención del repaso era identificar elementos que pudieran incorporarse en *Energy Plus* a la modelación de la intervención de los ocupantes en cuanto al uso de ventanas. Entre otras conclusiones, encontraron que:

- El comportamiento humano no es determinista, pero las tendencias de sus rutinas son reconocibles. Modelos basados en la probabilidad de cuándo se espera la acción estudiada, son los más adecuados para aprehender dicho comportamiento.
- Por lo general, las personas no operan sus ventanas de ma-

W/(m² K) por su superficie A en m². EL estudio fue longitudinal a lo largo de un año, de 2002 a 2003.

nera muy activa o regular durante el día. La mayor actividad de apertura y cierre se observa a la llegada y salida de la oficina. Esto sugiere que diferentes horas del día o diferentes estados de la ventana pueden requerir sus propias funciones de probabilidad.

- La temperatura es el impulsor más importante en la mayoría de los modelos, pero el contexto lo supedita. Por ejemplo, existe una variación sustancial de las probabilidades de control de ventanas en verano y en invierno, aunque se registre la misma temperatura exterior en ambas situaciones.
- No hay consenso sobre si la temperatura interior o la exterior es el factor dominante en la determinación del comportamiento. Los modelos que usan una o ambas variables producen buenos resultados. (Borgeson & Braguer, 2008, págs. 10-11)

Cuatro años después, Fabi et al. (2012) hicieron un seguimiento similar, incluyendo estudios de campo realizados en edificios de departamentos y casas unifamiliares en Dinamarca (Andersen, Toftum, & Olesen, 2009). Concluyeron que no fue posible alcanzar un enfoque único que identifique las principales fuerzas impulsoras.

Ahora bien, la mayoría de los estudios anteriores fueron hechos en oficinas, donde las personas no suelen tener el control total de su entorno ni se sienten lo suficientemente libres para operarlo. Aun así las conclusiones hablan de un alto nivel de aleatoriedad en el comportamiento humano. Eso puede hacerse aún más complejo si se trata de una vivienda, donde las personas sí pueden tener a su cargo la operación y control de un espacio que lo saben propio.

Bajo esta inquietud, se efectuó un estudio en Tecomán, una ciudad costera y muy cálida de México, respecto del ambiente térmico de tres casas idénticas (Moreno Peña, 2007). El estudio se dividió en dos fases de seis meses cada una. En la primera se

registró la temperatura (entre otras variables) en las viviendas desocupadas. Con ello se obtuvo el patrón térmico del modelo, en el que las diferencias entre cada unidad fueron irrelevantes. En la segunda fase dos viviendas fueron ocupadas por familias jóvenes y la tercera se mantuvo desocupada para funcionar como referente. En esta segunda fase se registró, mediante sensores electrónicos, la abertura de ventanas y puertas, además de la temperatura.

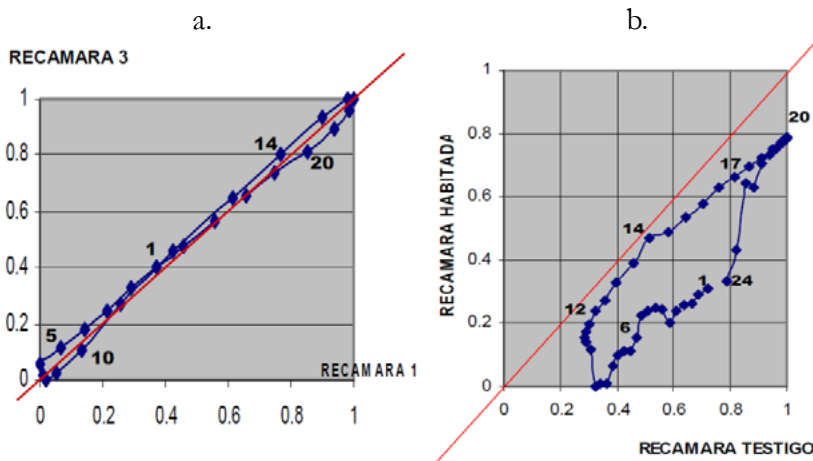


Figura 3.15. Correlación de temperaturas normalizadas de dos espacios.

Fuente: (Moreno Peña, 2007)

El resultado fue que las primeras semanas las acciones de abrir o cerrar determinada puerta o ventana, no siguió patrón alguno, motivadas tal vez por los cambios de la temperatura percibida, como parece haber sido la pauta en los estudios realizados en oficinas. Pero después fueron perfilándose rutinas muy claras. Ventanas que ya no se abrieron o que se dejaron abiertas casi todo el tiempo y otras que se abrían o se cerraban a intervalos regulares. Fue la curva de aprendizaje de los habitantes. El efecto de ello en el ambiente térmico interior fue notable. Las casas habitadas resultaron más frescas que la vivienda testigo, cuyas puertas y ventanas se mantuvieron sin cambio, como en la primera fase del

estudio (figura 3.15). De hecho, se registró un mejor desempeño térmico durante los fines de semana, cuando las casas se habitaban todo el tiempo, a diferencia de los días laborales en que los habitantes salían al trabajo o a la escuela durante buena parte del día.

La normalización se efectuó tomando como unidad la amplitud de la oscilación de temperaturas interiores (\overline{TS}_i) del espacio sin ocupación (en el eje X). 0 corresponde a la temperatura promedio mínima y 1 a la temperatura promedio máxima. Los registros de temperatura se hicieron durante el mismo periodo de tiempo en ambos espacios.

a = Etapa 1: sin ocupación. Ambos espacios tienen prácticamente el mismo desempeño.

b = Etapa 2: un espacio ocupado y el otro sin ocupación. La recámara habitada registra temperaturas por debajo de las registradas en la recámara testigo.

Fuente: (Moreno Peña, 2007, págs. 76-77)

Todo lo anterior hace pensar que los espacios habitables no sólo deban ser correctamente planeados, calculados, diseñados y construidos, sino que también deben ser correctamente habitados. Por eso, deben acompañarse de manuales de usuario, códigos de conducta, protocolos de procedimientos y cualquier otro complemento similar, con el propósito de que los habitantes cuenten con información veraz y oportuna de cómo opera el espacio en términos de climatización pasiva y desempeño energético, y puedan hacer el mejor uso de él.

Esto entraña incluso la necesidad de ir más allá que sólo ofrecer manuales o guías, sino también pensar en formar a las personas, desde la infancia, en temas de interacción con su espacio habitable: cuándo abrir ventanas y cuándo cerrarlas y porqué, por ejemplo; cuándo correr cortinas; cuándo encender y cuándo apagar la luz, la calefacción o el aire acondicionado; cómo obtener

mejores resultados de los dispositivos de climatización; etcétera. Es decir, formación en adaptación térmica e interacción con el hábitat desde la niñez, en el colegio como en el hogar.

Referencias

- Andersen, R., Toftum, J., & Olesen, B. (2009). Long Term Monitoring of Window Opening Behaviour: Investigations of Drivers for Behaviour in Danish Dwellings. *Architecture Energy and the Occupant's Perspective - 26th International Conference of PLEA - Proceedings* (págs. 490-493). Québec: Les Presses de l'Université Laval.
- ANSI/ASHRAE. (2013). ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 : Thermal Comfort Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ANSI/ASHRAE. (2021). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2021). *Handbook—Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHVE. (1932). *Guide*. American Society of Heating and Ventilating Engineers.
- Auliciems, A., & Szokolay, S. (2007). *Thermal Comfort*. Brisbane: PLEA in association with Department of Architecture, The University of Queensland.
- Banham, R. (1969). *The architecture of the well-tempered environment*. London - Chicago: The Architectural Press - The University of Chicago Press.

- Barney, B. (2 de mayo de 2013). Clima, arquitectura y práctica profesional. Obtenido de Torre de Babel: <https://www.torredebabel.info/clima-arquitectura-y-practica-profesional/>
- Bedford, T. (1936). The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation. (Report num. 76.). HMSO.
- Borgeson, S., & Braguer, G. (2008). Occupant Control of Windows: accounting for Human Behavior in Building Simulation. Berkeley: CBE Center for the Built Environment.
- Canul-Euán, L., Gómez-Azpeitia, L., & Bojórquez-Morales, G. (2018). Method to determine Indoors Thermal Comfort Range for Mexico's climates. 10th Windsor Conference 2018 - Rethinking Comfort - Proceedings (págs. 1117-1133). Windsor: NCEUB.
- Carrier. (2020). Historia del aire acondicionado. "1902-2002" 100 años de innovación. Obtenido de <http://www.carrier.es/news/history.html#:~:text=La%20historia%20del%20aire%20acondicionado,desarrollo%20el%20concepto%20de%20climatizaci%C3%B3n.&text=Los%20primeros%20en%20usar%20el,del%20sur%20de%20Estados%20Unidos.>
- CEN. (2008). Standard EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- Critchfield, H. (1974). General Climatology. Prentice-Hall.
- de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. ASHRAE Transactions (104), 145-167.
- Delaney, M., & Waterhouse, F. (1956). International Society of Bioclimatology and Biometeorology. Nature, 178, 966.

- Elton, C. (2001). *Animal Ecology* (1927 1st. ed.). Chicago: University of Chicago Press.
- Evans, J. (2003). Evaluating comfort with varying temperatures: a graphic design tool. *Energy and Buildings*, 35(1), 87-93.
- Evans, J. (2007). *The Comfort Triangles: a new tool for bioclimatic design*. (PhD Thesis). Technische Universiteit Delft.
- Evans, J., & Schiller, S. (1994). *Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar*. Buenos Aires: EUDEBA.
- Fabi, V., Andersen, R. V., Corgnatia, S., & Olesen, B. W. (2012). Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*, 58, 188-198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>
- Fanger, P. (1970). *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw Hill.
- Fanger, P., & Toftum, J. (2002). Prediction of Thermal Sensation in Non-air-conditioned Buildings in Warm Climates. *Indoor Air 2002: Proceedings, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. 1, págs. 92-97. Monterey: Indoor Air 2002.
- Fleure, H. (1919). Human regions. *Scottish Geographical Magazine* (35), 94-105.
- Gagge, A., Fobelets, A., & Berglund, P. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 709-731.
- Gagge, A., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77(pt.1), 247-262.
- Gardner, H. (1999). *Intelligence reframed: multiple intelligences for the 21st century*. New York: Basic Books.

- Givoni, B. (1962). The nature and application of thermal indices. *Bulletin Israel Institute of Technology* (73-74).
- Givoni, B. (1963). Estimation of the effect of climate on man: development of a new thermal index. *Building Research Station*. Technion. Haifa: Research Report to UNESCO.
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam, New York: Elsevier.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Givoni, B. (2010). Thermal Comfort Issues and Implications of High-Density Cities. En E. Ng (Ed.), *Designing High Density Cities for Social and Environmental Sustainability* (págs. 87-106). London: Earthscan.
- Givoni, B., & Vecchia, F. (2001). Predicting Thermal Performance of Occupied Houses. *Proceedings of the PLEA 2001* (págs. 701-706). Florianópolis: Organizing Committee of PLEA'2001.
- Gómez-Azpeitia, G. (Ed.). (2011). *Dónde habita la violencia: violencia doméstica y arquitectura*. Puebla: Universidad de Colima. Red de Investigación Urbana.
- Gómez-Azpeitia, G., & Gómez Amador, A. (2015). Sostenibilidad y habitabilidad: ¿condiciones en pugna? En R. Valladares Anguiano (Ed.), *Diversas visiones de la habitabilidad* (págs. 39-70). Puebla: RNIU Red de Investigación Urbana A.C.
- Gómez-Azpeitia, G., Bojórquez, G., & Ruiz, R. (2007). El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa*, II(1), 45-57.
- Gómez-Azpeitia, G., Givoni, B., Alcántara, A., & Barragán, P. (2005). *Human Factors in the Thermal Performance of Na-*

- naturally Ventilated Buildings. *International Journal of Ventilation*, 4(3), 245-253.
- Government of Canada. (16 de 04 de 2019a). Warm season weather hazards. Obtenido de Environment and natural resources: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/seasonal-weather-hazards/warm-season-weather-hazards.html#toc7>
- Government of Canada. (04 de 12 de 2019b). Glossary. Obtenido de Environment and natural resources: https://climate.weather.gc.ca/glossary_e.html
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433. doi:10.2307/4072271. JSTOR 4072271
- Houghton, F. C., & Yagloglou, C. P. (1923). Determination of comfort zone. *Transactions ASHVE*, 29, 361.
- Humphreys, M. (1978). Outdoor temperature and comfort indoor. *Batiment International/Building Research & Practice*, 6(2), 92-92.
- Humphreys, M. (1994). Field Studies and Climate Chamber Experiments in Thermal Comfort Research. En N. Oslands, & M. Humphreys, *Thermal Comfort: Past, Present and Future* (págs. 52-72). Watford: Building Research Establishment Report, BRE.
- Humphreys, M., & Nicol, J. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transaction*, 104(1), 991-1004.
- Humphreys, M., Nicol, F., & Roaf, S. (2016). *Adaptive Thermal Comfort. Foundations and Analysis*. Devon: Earthscan from Routledge.

- Huntington, E. (1915). *Civilization and Climate* (Third Edition 1924, Revised and Rewritten with Many New Chapters ed.). New Haven: Yale University Press.
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22(2), 415-427. doi:10.1101/sqb.1957.022.01.039
- International Society of Biometeorology. (2020). International Society of Biometeorology. Obtenido de Biometeorology / General Study Areas: <https://uwm.edu/biometeorology/what-is-biometeorology/general-study-areas/>
- ISO. (2005a). ISO 10551:1995 (E) Ergonomic of the thermal environment using subjective judgement scales. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO. (2005b). 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. Geneva: International Organization for Standardization.
- Janda, K. (2011). Buildings don't use energy: People do. *Architectural Science Review*, 54(1), 15-22.
- Keys, A., Fidanza, F., Karvonen, M., Kimura, N., & Taylor, H. (1972). Indices of relative weight and obesity. *Journal of Chronic Diseases*, 25(6), 329–343. doi:10.1016/0021-9681(72)90027-6
- Koenigsberger, O., Mahoney, K., & Evans, J. (1970). *Climate and house design*. New York: United Nations.
- Krüger, E., & Givoni, B. (2004). Predicting thermal performance in occupied dwellings. *Energy and Buildings*, 36(3), 301-307.
- Los, S. (1983). Passive solar systems versus architecture. En S. Yanas (Ed.), *The Second International PLEA Conference*.

- (págs. 837-842). Crete: Pergamon Press. doi:10.1016/B978-0-08-030581-3.50103-1
- Masterson, J., & Richardson, F. (1979). Humidex; a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Downsview: Canada Atmospheric Environment Service.
- McCartney, K., & Nicol, J. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 2002(34), 623–635.
- Moreno Peña, J. (2007). Análisis del efecto de la actividad de los usuarios en el desempeño termico de dos casas de interés social en Tecomán, Colima. (Tesis Doctor en Arquitectura). Universidad de Colima.
- Morgan, N., & Gomez-Azpeitia, G. (2018). Development of a Mexican standard of thermal comfort for naturally ventilated buildings. En L. Brotas, S. Roaf, J. Nicol, & M. Humphreys, *Rethinking Comfort. Proceedings of 10th Windsor Conference* (págs. 596-607). Windsor UK: NCEUB Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
- Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive Thermal Comfort. Principles and Practice*. Kent: Earthscane from Rutledge.
- Olgyay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Oxford University Press. (2020). *Oxford Learner's Dictionaries*. Obtenido de comfortable: <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/comfortable?q=comfortable>
- Pérez Porto, J., & Merino, M. (2018). Definición de. Obtenido de Definición de Bioclima: <https://definicion.de/bioclima/>
- RAE. (2019a). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de bioclimático, ca: <https://dle.rae.es/bioclim%C3%A1tico>

- RAE. (2019b). Diccionario de la lengua española. Obtenido de bienestar: <https://dle.rae.es/bienestar?m=form>
- RAE. (2019c). Diccionario de la lengua española. Obtenido de confort: <https://dle.rae.es/confort?m=form>
- Real Academia Española. (2014). Diccionario de la lengua española (23a. ed.). Obtenido de <http://dle.rae.es>
- Scaetta, M. (1935). Terminologie Climatique, Bioclimatique et microclimatique. *La Météorologie*(11), 342-347.
- Serra Florensa, R. (1996). Prefacio a la edición española. En V. Olgyay, *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.* (pág. VI a VIII). Barcelona: Gustavo Gili S.A.
- Szokolay, S. (1984). Passive and low energy for thermal and visual comfort. *Proceedings of the International Conference on Passive and Low Energy. Ecotechniques Applied to Housing.* Tome I, págs. 11-28. Mexico: Pergamon Press.
- Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architecture Science. The basis of sustainable design.* Oxford, UK: Elsevier LTD.
- TRNSys. (2019). *Transient System Simulation Tool.* Obtenido de Home: <http://www.trnsys.com/>
- U.S. Department of Energy. (27 de March de 2020). *Energy Plus Essentials.* Obtenido de *Energy Plus Documentation:* https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.3.0/EnergyPlusEssentials.pdf
- Winslow, C., Herrington, L., & Gagge, A. (1937). Physiological reactions to environmental temperature. *American Journal of Physiology*(120), 1-22.
- Zevi, B. (1978). *Saber ver la arquitectura* (2a ed.). Barcelona: Posidón.

4. HÁBITAT ADAPTADO

4.1 Bioclimática aplicada

Poco antes de la primera reunión de la Sociedad Internacional de Bioclimatología (ISB), realizada en 1956⁵³, J. W. Drysdale había publicado una serie de criterios climáticos a considerar en el diseño de edificios para Australia (Drysdale & Commonwealth Experimental Building Station, 1949). También es el caso de Jeffrey Ellis Aronin, en cuya tesis de maestría en arquitectura, presentada en la McGill University de Canadá (Aronin J. , 1951), y en el artículo derivado de ésta (Aronin J. , 1953), sistematizó los elementos que habrían de constituir lo que hoy se conoce como bioclimática. A su vez, Jaques Dreyfus publicó el primer libro formal sobre el tema (Dreyfus, 1960), apenas cuatro años después de la primera reunión de la ISB.

Sin embargo, como ya se dijo en el capítulo 3, es *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism* del arquitecto y académico de la Universidad de Princeton, Victor Olgyay (1963), el que se considera el documento fundacional de la disciplina que ha dado en llamarse arquitectura bioclimática. Ahora bien, Olgyay no habla de “arquitectura bioclimática” como tal, sino de un enfoque sistemático de balance climático aplicado a la arquitectura (Olgyay, 1963, pág. 10). Así pues, fueron otros autores quienes afrontaron la tarea de definir esa, que parecía ser una novedosa arquitectura, a la que pronto se le añadió el apellido “bioclimática” para diferenciarla de aquella que resultaba de la práctica convencional, propia de la segunda mitad del siglo XX (véase la crítica a la adjetivación de la arquitectura en el apartado 3.1).

53. Véase el apartado 3.1 de este libro.

4.1.1 Definición

Jean Louis Izard y Alain Guyot (1980), miembros del grupo francés ABC (Ambiente Bio-Climático), razonan que el principio esencial de la bioclimática es “construir con el clima”, idea que tiene antecedente en el concepto de “ecodiseño”, término usado por primera vez por Eduardo Neira Alva (1975) y desarrollado más tarde por otros autores como una “armonización de la forma arquitectónica con el medio natural, y más específicamente con la adaptación del hábitat al clima, al ambiente y a ciertas tradiciones culturales” (Baczko, Sachs, Vinaver, & Zakrzewski, 1977). Así Izard & Guyot, (1980, pág. 176) definen a la bioclimática como “la ciencia que tiende a cumplir por medio de la arquitectura misma, la función de satisfacción de las exigencias térmicas del ocupante, recurriendo preferentemente a la ingeniería climática”.

Everardo Hernández (1983, pág. 163) complementa esta idea con la precisión de dos aspectos fundamentales:

- a. es la construcción, es decir el continente o envolvente del edificio, la parte material de la arquitectura, lo que desempeña la función de interactuar con los elementos meteorológicos del lugar; y
- b. tal interacción consiste en regular los intercambios de materia y energía entre el exterior y el interior.

Este intercambio de energía y materia constituye la función sustantiva tanto de la interfaz de habitabilidad como de la de sostenibilidad, que acopla al objeto habitable con el sujeto que la habita y con el hábitat en que se asienta, tal como se planteó en el apartado 3.2 y se mostró en el mapa conceptual de la figura 3.1.

Con la exigencia de optar por el empleo de energías limpias para la operación de ese intercambio que también fue discutida en el capítulo anterior, la definición de bioclimática, como disciplina aplicada a la arquitectura, podría actualizarse de la siguiente forma:

La bioclimática consiste en el arreglo coordinado de elementos:

1. arquitectónicos (espacios y envolventes),
2. de paisaje (árboles, arbustos, áreas verdes, cuerpos y corrientes de agua),
3. constructivos (muros, cubiertas, plataformas y estructuras), y
4. mecánicos (puertas, ventanas, cortinas, dispositivos, instalaciones, etc.), determinados con base científica, para regular el intercambio de materia (agua, aire) y energía, (calor, luz) entre el entorno circundante y el espacio habitable, a fin de transformar su microclima y adaptarlo a condiciones de bienestar térmico (fisiológico y perceptual) para sus habitantes, utilizando para ello energías preferentemente pasivas o activas limpias, y una interacción proactiva de los habitantes, a fin de que el desempeño integral (arquitectura + habitantes) tienda a una huella de carbono nula.⁵⁴

Como puede observarse, esta definición se compone de cinco ámbitos conceptuales. El primero establece en qué consiste; el segundo precisa el método; el tercero determina su objetivo; el cuarto expresa su finalidad; y el quinto delimita su compromiso ético y ambiental.

El primer ámbito de la definición ha quedado suficientemente explícito en el propio enunciado, mediante el desglose de cuatro categorías de componentes que determinan su consistencia. Por su parte, en los capítulos previos de este libro, se han desarrollado las categorías de objetivo, finalidad y compromiso. No es así el caso del ámbito de orden metodológico que requiere de un abordaje más profundo, el cual se plantea a continuación.

54. Se considera huella de carbono nula cuando el balance neto de emisiones de GEI —usualmente considerados como equivalentes al bióxido de carbono CO₂— y de acciones de compensación emprendidas —en este caso asociadas a la generación de energía que demanda el ciclo de vida de los edificios— se reducen a prácticamente cero.

4.1.2. Método

En la definición del apartado anterior se ha querido hacer explícito el componente metodológico que incorpora una premisa que Sergio Los (1983) había advertido con mucha claridad: la formulación de proyectos bioclimáticos es un trabajo de base científica que complementa las rutinas tradicionales del proyecto arquitectónico, por lo regular alejadas de los procedimientos de carácter científico.

En efecto, Olgyay (1963, págs. 11-13) propuso los procedimientos científicos que demanda la bioclimática y los organizó en cuatro grandes pasos secuenciales. Estos pasos configuran cuando menos una parte importante del método para el diseño con enfoque bioclimático de edificios y espacios habitables, que comprende desde los procesos iniciales hasta la formulación de una propuesta en fase de prediseño o anteproyecto. Los pasos que planteó Olgyay son:

- a. Interpretación de los datos climáticos del sitio.
- b. Evaluación biológica de las necesidades del habitante.
- c. Determinación de soluciones tecnológicas.
- d. Aplicación al proyecto arquitectónico.

Sin embargo, un proceso completo de proyectación⁵⁵ en arquitectura debe considerar más pasos hasta concluir con la ocupación del inmueble por sus habitantes. En ese sentido, además de los pasos propuestos por Olgyay, habría que agregar una evaluación del proyecto arquitectónico y sus partes que compruebe su eficiencia en términos de desempeño térmico, lumínico y de consumo energético, de manera previa a la formulación del proyec-

55. La palabra *proyectación* no tiene reconocimiento oficial en el Diccionario de la RAE, y según *definiciona.com* se trata de un término en desuso. No obstante, es un término ampliamente utilizado en el medio de las disciplinas que trabajan por medio de proyectos, principalmente la arquitectura y el diseño. En ese ámbito puede entenderse como el conjunto de acciones que implica desarrollar y resolver un proyecto.

to ejecutivo definitivo. Finalmente, habría que añadir un último paso, que debía incluir una posible certificación ambiental —ya sea voluntaria u obligatoria—, los cambios de proyecto decididos durante la construcción, la ocupación y operación del inmueble y una eventual evaluación post-ocupación que retroalimente al diseñador.

La ausencia de estos pasos en la lista original de Olgyay, es comprensible debido a que en la época en que hizo su propuesta aún no estaban desarrolladas las herramientas de cómputo y simulación virtual que hoy en día facilitan las acciones de comprobación, ni tampoco existían los sistemas de certificación sostenible como *Breeam* (Building Research Establishment Environmental Assessment Method, desarrollado en la Gran Bretaña), *Leed* (Leadership in Energy and Environmental Design, desarrollado en los Estados Unidos), *Verde* (Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios, desarrollado en España), *Passivhaus* (“Casa Pasiva” en alemán, desarrollado por el Passivhaus Institut) o *Edge* (*Excellence in Design for Greater Efficiencies*, desarrollado por la International Finance Corporation del Banco Mundial), entre muchos otros que se aplican actualmente en diferentes partes del mundo.

En la tabla 4.1, se despliega una lista de las fases constitutivas de un posible método a seguir para la formulación de un proyecto bioclimático. La lista comprende tanto los cuatro pasos originales propuestos por Olgyay, como los dos pasos adicionales planteados en párrafos anteriores. La lista incluye también una pregunta de trabajo que justifica a cada una de las fases, y desencadena las acciones necesarias para alcanzar unas metas objetivo que a su vez constituyen insumos necesarios para solventar las preguntas asociadas a las fases subsiguientes:

Tabla 4.1. Método para el diseño con enfoque bioclimático de edificios y espacios habitables

Fase	Pregunta de trabajo	Acciones a desarrollar	Metas a obtener
1 Recopilación y sistematización de información climática	¿Cómo es el clima del sitio?	<ul style="list-style-type: none"> Localización de fuentes de información climática. Recopilación, organización e interpretación de datos climáticos del sitio. 	<ul style="list-style-type: none"> Tablas y gráficos con la información climática completa, confiable, organizada y clara.
2 Análisis y diagnóstico bioclimático	¿Qué demanda el bioclima del sitio al proyecto arquitectónico?	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación biológica de las necesidades térmicas del habitante. 	<ul style="list-style-type: none"> Diagnóstico mediante cartas bioclimáticas y fórmulas de confort emanadas de estándares nacionales o internacionales. Programa de requerimientos y estrategias de bioclimatización aplicables al proyecto.
3 Desarrollo de proyecto bioclimático	¿Qué elementos y características debe reunir el proyecto arquitectónico para responder a los requerimientos bioclimáticos?	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de soluciones tecnológicas aplicables al proyecto Selección, incorporación y adaptación de técnicas, tácticas, sistemas y/o dispositivos de climatización pasiva o activa limpia en el proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> Propuesta arquitectónica inicial, incluyendo tácticas de bioclimatización.
4 Comprobación del desempeño térmico del proyecto	¿El desempeño del proyecto satisface los requerimientos bioclimáticos?	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación del desempeño térmico, lumínico y/o energético del proyecto, mediante técnicas de simulación sobre modelos físicos o virtuales. 	<ul style="list-style-type: none"> Memoria técnica del desempeño térmico, lumínico y/o energético del proyecto. Guía de uso de los componentes bioclimáticos del proyecto, para el habitante.
5 Certificación, construcción, ocupación y operación del edificio	¿El desempeño del proyecto cumple con normas oficiales y estándares voluntarios?	<p>Aplicación de normas oficiales y estándares voluntarios para calificar el desempeño del edificio. Registro de cambios en el proyecto que alteren el desempeño térmico, lumínico y/o energético del edificio, por motivos de fuerza mayor decididos durante la construcción. Evaluación del grado de satisfacción de los habitantes mediante entrevistas y/o monitoreo de datos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Licencias y autorizaciones de construcción y ocupación oficiales. Certificación de edificio sostenible. Memoria de evaluación post-ocupación para retroalimentar a los habitantes y proyectistas.

Ahora bien, la concepción propia de un método aplicable al desarrollo de proyectos de arquitectura debe caracterizarse por su flexibilidad y adaptación a las necesidades siempre cambiantes de los procesos de diseño. Por eso el método que se propone aquí no debe interpretarse como algo rígido, a riesgo de convertirse en una camisa de fuerza en vez de un auxiliar que conduzca y facilite el desarrollo de los proyectos. En ese sentido, la aplicación del método, si bien tiene un componente secuencial muy claro, tendría que ajustarse a las particularidades que cada caso demande.

Por ejemplo, las fases 1 y 2 podrían obviarse cuando el diseñador las ha realizado ya para la misma región y para el mismo tipo de habitantes, por lo que las metas obtenidas pueden considerarse viables para nuevos proyectos, Sin embargo, sí tendrán que realizarse tantas veces sea necesario, cuando se trate de otras regiones, especialmente si el diseñador desconoce sus particularidades climáticas. Igualmente sería el caso si se tratara de un proyecto destinado a una población diferente a la habitual, por ejemplo, cuando se trate de personas de la tercera edad o con alguna necesidad especial cuyo diagnóstico bioclimático deberá ser revisado. Asimismo, el fenómeno del cambio climático hace que los procesos deban revisarse de manera periódica, cada vez que se actualicen las normales climatológicas de cada lugar, cosa que ocurre usualmente cada diez años.

Por su parte, la acumulación de experiencias exitosas, preferentemente comprobadas mediante las acciones sugeridas en la fase 5, hacen del diseñador un experto que manejará cada vez con mayor destreza las demandas bioclimáticas de sus proyectos, con lo cual las acciones propias de las fases 3 y 4 podrán reducirse, aunque nunca podrán omitirse del todo.

La figura 4.1 es un diagrama de flujo que muestra la secuencia básica de las diferentes fases que constituyen el método propuesto, pero con un cuadro de decisión entre fase y fase, cuyo escla-

recimiento determinará si es necesario o no emprender las acciones destinadas a lograr las metas-objetivo correspondientes. El despeje de esa decisión determinará si puede ejecutarse un salto hacia adelante o incluso un retroceso, cuando la imposibilidad de franquear una determinada decisión se debe a fallas u omisiones que corresponden a fases previas.

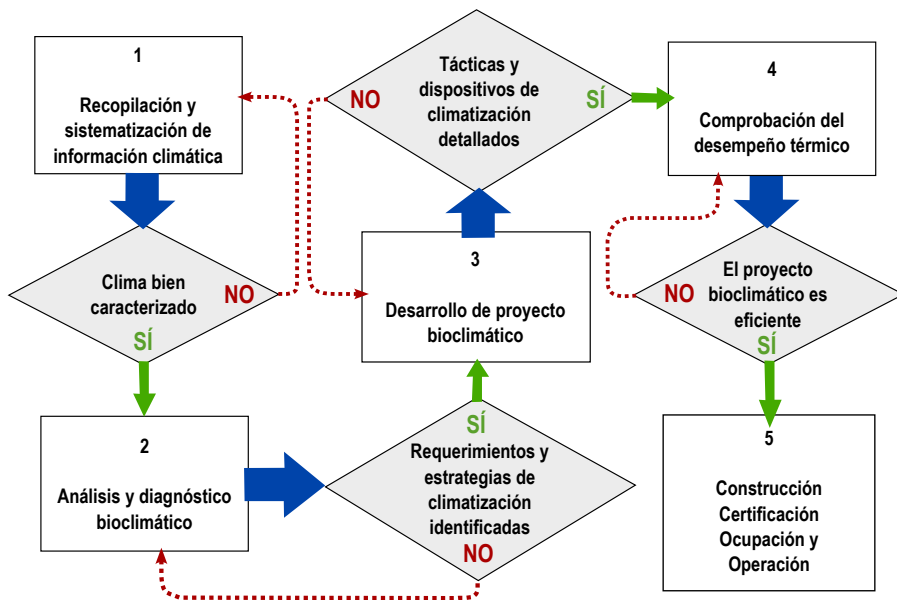


Figura 4.1. Diagrama de flujo del método para diseño con enfoque bioclimático.

4.1.3. Componentes disciplinares

En el marco de la base científica que implica el diseño con enfoque bioclimático, Olgay (1963) planteó que la resolución eficiente de las acciones previstas en su método requiere del dominio de cuatro complejos disciplinares donde confluyen en cada uno de ellos, dos o más áreas de conocimiento fundamentales. Olgay denomina estos cuatro amplios ámbitos disciplinares como climatología, biología, tecnología y arquitectura (figura 4.2).

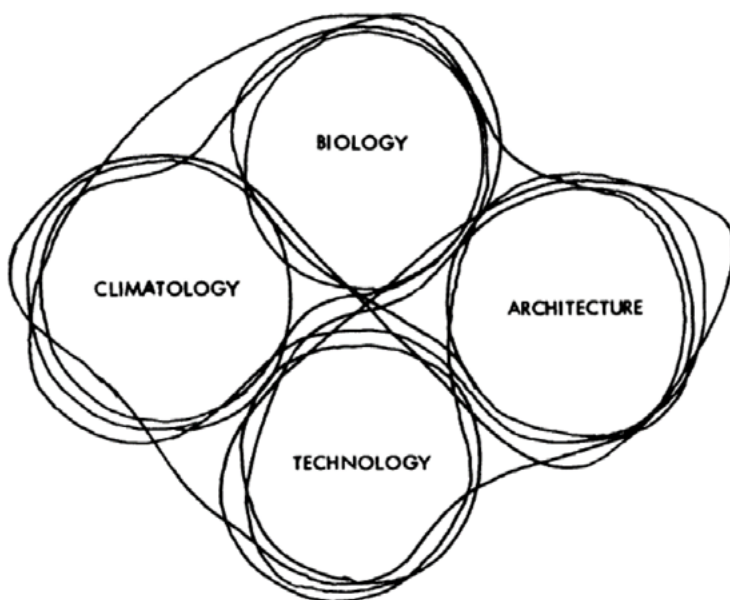


Figura 4.2. Campos de conocimiento entrelazados para un enfoque sistemático de balance climático en la arquitectura.

Fuente: (Olgay, 1963, pág. 12)

El primero de ellos atiende al contexto natural o hábitat en que se asienta el proyecto a desarrollar, en particular a las condiciones que imperan en el clima local. Por lo tanto, demanda, la comprensión básica de los fenómenos atmosféricos en lo general, y muy especialmente de climatología, que incluye tanto la normalización estadística de eventos meteorológicos a lo largo de un periodo largo de años en un mismo sitio, como su variabilidad. Estos tópicos han sido abordados en el segundo capítulo de este libro.

El segundo campo disciplinar atañe al sujeto-habitante en cuanto a sus necesidades de adaptación a su ambiente térmico. Su correcto manejo exige conocimientos de fisiología, específicamente sobre termorregulación, y de psicología, en especial sobre percepción térmica. Saberes que, desde el último cuarto del siglo

pasado, han ido consolidando el área específica de estudios sobre el confort térmico. Estos campos forman parte de una categoría más amplia que incluye a todos los seres vivos, razón por la que Olgyay la denominó biología. Sus particularidades fueron desarrolladas en el tercer capítulo de este libro.

El tercer ámbito disciplinar comprende un aspecto muy importante inscrito en el contexto o hábitat antropogénico, a saber, las posibilidades tecnológicas disponibles para enfrentar la tarea de adaptación de la manera más sostenible posible. Ello implica conocimientos y destrezas relacionadas con la física, y más puntualmente, con la termodinámica. No es propósito de este libro ahondar en los cálculos y estimaciones matemáticas tendientes a simular el desempeño energético —en lo general— y térmico —en particular— de los edificios. La razón principal es que estos procedimientos deben realizarse en la etapa de proyecto ejecutivo, cuando ya están prácticamente detallados, dimensionados y especificados los elementos constructivos y estructurales, y funciona como un ejercicio de evaluación y retroalimentación que, dado el caso, remitiría a la modificación de alguno o más componentes del proyecto. De hecho, estos procedimientos están extensamente desarrollados en software de amplia distribución como *Energy Plus* (U.S. Department of Energy, 2020), motor de simulación de código abierto, o bien su aplicación comercial más exitosa, *Design Builder* (2018), que contempla una interfase bastante amigable con el lenguaje arquitectónico. Sí se incluyen aquí, en cambio, algunos conceptos básicos relativos a la termodinámica, apropiados para la etapa de prediseño a la que se aboca la hoja de cálculo *bioclimarq*, y por ende, este libro. Tal repaso se hace desde una perspectiva de aplicación práctica en el desarrollo de proyectos de arquitectura con enfoque bioclimático, más que desde una profundización teórica y matemática. Su exposición forma parte del apartado 4.1.4 de este capítulo.

Finalmente, la vasta área disciplinar concerniente al objeto habitable —suma de espacios y sus continentes materiales— abarca dos categorías, a cuál más importante: la referida al diseño arquitectónico en general —no contemplada como tal en este libro, puesto que se da por hecho que es una materia sustantiva en la formación de los profesionales de la arquitectura— y la referente al diseño con enfoque bioclimático en lo particular, tratada en el apartado 4.1.5 este capítulo.

4.1.4. La termodinámica de los edificios

En términos amplios, en Física se le llama energía a la capacidad de realizar un trabajo. La termodinámica es la parte de la física que estudia las transformaciones de la energía y sus efectos sobre la materia, manifestados en cambios de fase o estado (líquido a gaseoso o sólido a líquido, etc.) o en trabajo mecánico, como la expansión de un gas (Abbott & Van Ness, 1976, pág. 1) (Szokolay, 2008, pág. 7). En esta disciplina científica el calor es la manifestación más estudiada de la energía. Se fundamenta en tres principios esenciales, que se le conocen también como las *Leyes de la Termodinámica*. Estas leyes tienen un origen primitivo, es decir, no se derivan de otras leyes de la naturaleza, y por lo tanto ejercen una acción restrictiva sobre las posibles propiedades de la materia y la energía (Callen, 1985, pág. 3).

Para entender cómo se conduce la energía que transcurre a través de la envolvente física de los edificios, sólo es necesario revisar las dos primeras leyes de la termodinámica, ya que la tercera se refiere a condiciones de estado a una temperatura de cero absoluto (Callen, 1985, pág. 278), cosa que no ocurre en nuestra existencia cotidiana⁵⁶.

56. Se le llama *cero absoluto* a la temperatura más baja posible, estado en el que, según la física clásica, las moléculas carecen de movimiento, es decir, de energía. Equivale a una temperatura de 273.15 K bajo cero. De acuerdo con la física cuántica, aún es posible encontrar energía residual a esa temperatura, por lo que se le llama energía de punto cero.

La primera ley establece el principio de conservación de la energía, en el que se plantea que la energía —como la materia— no se crea ni se destruye, sólo se transforma (Szokolay, 2008, pág. 7). En este sentido, parte de la energía que emite el Sol, que en su mayoría es radiación visible (luz) pero que también se compone de otras formas de radiación como los rayos X, radiación gamma, ultravioleta, e infrarroja (ésta última conocida como la radiación calorífica) o incluso ondas de radio (Méndez-Pérez, 2015), llega a la Tierra y se transforma, por ejemplo, en energía química por la fotosíntesis de las plantas verdes, la cual alimenta a los seres del reino animal, que a través de la digestión la transforman en movimiento, sonido o calor y así sucesivamente. Al final, la cantidad de energía en el universo no varía: la cantidad de energía del estado original es igual a la suma de las diferentes formas de energía después de sus transformaciones.

Por su parte, la segunda ley de la termodinámica diferencia los procesos irreversibles —que proceden sólo en una determinada dirección— de los reversibles, determinando así el principio de direccionalidad de la energía, en el sentido de que la energía se mueve siempre de un estado determinado a otro que contiene menor capacidad de cambio. En ese sentido, el calor siempre fluye de un cuerpo “caliente” a uno “más frío” —es decir “menos caliente”— y nunca al revés (ASHRAE, 2021).

En este contexto, la envolvente material de un edificio recibe la energía solar, parte de esta es reflejada o emitida hacia el exterior, y parte se transforma en calor, aumentando así la temperatura de sus elementos arquitectónicos y generando un flujo, cuya direccionalidad va siempre hacia otros elementos localizados en su cercanía (sólidos, líquidos o gaseosos) de menor temperatura, en la búsqueda de un equilibrio térmico, que se interpreta como una igualdad: calor cedido = calor ganado. Este equilibrio se manifiesta cuando ambos elementos igualan su temperatura. El

elemento a menor temperatura, al que se dirige el flujo de calor, puede estar en el interior del edificio (masa de aire interior, superficies interiores, muebles, personas, etc.), en cuyo caso, el efecto es de calefacción: el espacio interior *gana* calor. Por el contrario, el sistema a menor temperatura puede estar al exterior (subsuelo, aire exterior, etc.) lo que generaría un efecto de refrigeración al interior, pues en este caso el edificio toma calor también de los objetos que ocupan el espacio interior y lo dirige hacia afuera, en síntesis: el espacio interior *pierde* calor. Como se ve, basta con inducir el flujo de calor en un sentido o en otro, para lograr un efecto de climatización pasiva, es decir, sin la intervención de una fuente de energía ajena al ecosistema.

De ahí que resulta muy conveniente para los diseñadores de arquitectura conocer con cierta profundidad lo que es el calor, sus diferentes formas de transmisión, así como las propiedades térmicas de los materiales y sistemas constructivos, a fin de estar en condiciones de plantear una ruta apropiada al flujo de calor a través del edificio, que propicie el efecto de climatización deseado: enfriar o calentar, según sea el caso.

El calor

El calor es una forma de la energía que se manifiesta mediante el movimiento molecular de la materia. Cuando ésta recibe un aporte de calor, se incrementa la energía cinética de sus moléculas dando lugar a choques cuya intensidad es directamente proporcional a la cantidad de energía recibida. De esta manera el calor se puede medir de dos formas: por su cantidad, mediante unidades de energía: joules (J), watts (W), calorías (cal), BTU's (*British Thermal Unit*), etc., y por la cantidad de energía interna contenida en un cuerpo, mediante grados de temperatura: Celsius —o Centígrado— (°C), Fahrenheit (°F), Kelvin (K), etc. Cuando la excitación molecular se propaga más allá de las fronteras del

material, contagia ese movimiento a otros elementos con menos ímpetu, es decir, menos temperatura, hasta que la intensidad se iguala (el elemento de origen pierde temperatura y el de destino la incrementa) y entonces se llega al equilibrio termodinámico. Así, el calor puede ser definido como la energía en tránsito a través de un sistema termodinámico; dicho tránsito se origina en virtud de la diferencia de temperaturas entre el sistema y el medio que lo rodea (Jiménez Bernal, Gutiérrez Torres, & Barbosa Saldaña, 2014, pág. 31).

El calor que afecta a cualquier edificio puede provenir de dos fuentes: el exterior (principalmente del Sol, pero también, otros edificios, objetos, vehículos, máquinas, calderas y superficies que lo rodean) o su propio interior (personas, equipos eléctricos, maquinaria en operación, superficies interiores). Cuando el requerimiento de climatización es calentar, el diseño del edificio debe estar abierto a las ganancias de calor provenientes del exterior, pero cerrado a la pérdida del calor generado dentro. En cambio, cuando el requerimiento es enfriar, el diseño del edificio debe bloquear toda ganancia de calor que venga del exterior, y propiciar la pérdida del calor generado en su interior, dirigiéndolo hacia afuera.

Formas de transmisión del calor

Existen tres formas de transmisión del calor, en función del contacto existente o no entre las moléculas de los elementos que participan de la transferencia. Estos son: conducción, convección y radiación.

La conducción consiste en el aporte de movimiento molecular de un elemento a otro⁵⁷, de tal manera que ambos están en contacto mutuo. Para que ocurra, las moléculas de ambos deben tocarse a fin de que el ímpetu pueda fluir de uno —el más ca-

57. Usualmente de sólido a sólido, pero también puede ocurrir de sólido a fluido (gas o líquido), de fluido a sólido o de fluido a fluido.

liente— al otro —el más frío—. Cuando la intensidad del movimiento se iguala en ambos sistemas (es decir: alcanzan la misma temperatura) se llega al balance termodinámico. Para el caso que nos ocupa, el edificio debe estar en contacto con elementos menos calientes para enfriarse, o más cálidos para calentarse.

Las formas arquitectónicas en que se recurre a esta forma de transmisión del calor con propósito de climatizar el espacio habitable son:

5. La construcción subterránea o semienterrada, donde el subsuelo constituye la masa fresca o tibia buscada, según el caso.
6. La disposición de volúmenes significativos de tierra y/o vegetación, usualmente sobre la cubierta —sistema conocido como techo verde o cubierta vegetal (*green roof*)⁵⁸—, en el que el sustrato y la masa vegetal constituyen el sistema fresco o tibio que se busca. La masa vegetal también puede colocarse sobre los muros para intentar el mismo efecto —sistema conocido como muro verde o jardín vertical (*green wall*)—.
7. El adosamiento de dos o más edificios entre sí, de tal manera que sus elementos comunes —ya sean duplicados o compartidos entre medianeras— ayudan a conservar el calor, por lo tanto, este sistema es recomendable sólo para climas templados a fríos.
8. El aislamiento mediante una capa de material abundante en poros o burbujas de aire (entre más pequeñas, mejor)

58. Hay ejemplos de arquitectura histórica, cuya vigencia alcanza prácticamente hasta principios del siglo XX, donde se usaba un sistema de cubiertas denominado “terra-do”, consistente en un entramado de vigas de madera sobre el que se colocaban losetas de barro y encima volúmenes gruesos de tierra apisonada. Aunque en este caso no se incluía la vegetación, la masa de tierra funcionaba como sistema frío o tibio que ayudaba a climatizar los espacios interiores. Por razones principalmente estructurales, este sistema ya no es utilizado.

que evita el *contagio* del ímpetu molecular de un sistema al otro. Esta barrera a la transmisión del calor, se le conoce como *aislamiento conductivo*.

9. La construcción masiva, a base de materiales densos y espesores amplios, que constituyen un freno a la transmisión de calor debido a que el flujo atraviesa con mucha lentitud, dando la sensación de que la energía se “deposita” en el elemento constructivo, por ese motivo se le llama *aislamiento capacitivo*. Sin embargo, la energía no se puede acumular en un depósito pues, por definición, se trata de un tránsito permanente. Por lo tanto, el flujo de calor saldrá eventualmente por el lado opuesto a la cara por donde se recibió el aporte, pero tiempo después de haberlo absorbido, fenómeno al que se le denomina *retraso* o *desfase térmico* (ϕ) (*thermal delay*). Este retraso es directamente proporcional a la conductividad térmica del material (k) —la cual a su vez depende de su densidad (ρ) — y al espesor (d) del elemento.

La convección corresponde a la situación en que al menos uno de los dos sistemas es un fluido, ya sea líquido o gaseoso, por ejemplo, una azotea y el aire, nuestra piel y el aire, o el océano y la atmósfera (ambos fluidos). En estos casos, las moléculas del cuerpo con mayor temperatura (la azotea, el océano o la piel, por ejemplo) calientan al aire de sus inmediaciones, con lo que baja la densidad del aire y se generan burbujas que se mueven llevando consigo el calor que les cedió el cuerpo de mayor temperatura. Una consideración interesante de esta forma de transmisión del calor es que el fluido en cuestión puede servir también como agente transmisor entre dos sistemas sólidos cuyas moléculas no tienen contacto entre sí, por ejemplo, los muros enfrentados dentro de una habitación o las paredes opuestas, cámara de aire de por medio, de un muro hueco. Así, el sólido de mayor temperatura contagia su ímpetu a las moléculas del fluido y éste a su vez,

lo hace con las moléculas del sólido frío, hasta alcanzar el balance termodinámico, cuando los sistemas involucrados igualan su temperatura.

Para efectos de la termodinámica de los edificios, el fluido que interviene en este proceso es el aire, de ahí que su aprovechamiento puede lograrse mediante el manejo de dos de sus atributos: la velocidad de su movimiento y su contenido de humedad. Al resultado de gestionar el atributo de la velocidad se le denomina *ventilación*, y al de la humedad se le llama *evaporación*. En ambos casos el aprovechamiento de ese efecto suele ser para enfriamiento, por lo que se recomienda especialmente para climas cálidos. De las soluciones arquitectónicas a base de energías pasivas que corresponden a esta forma de transmisión del calor, se pueden mencionar las siguientes:

- a. La ventilación natural cruzada, cuyo funcionamiento depende del viento prevalente en el sitio, para lo que se requiere aplicar a la envolvente arquitectónica dos aberturas en el eje de la dirección del viento —o cercana a éste—, una de entrada y otra de salida, de preferencia enfrentadas una a la otra. Su desventaja consiste en que no opera cuando ocurren calmas de viento.
- b. La ventilación natural inducida, que corresponde a ciertos arreglos de las aberturas de entrada y salida del viento, que inducen a que éste se mueva incluso cuando ocurran calmas en el viento. Existen diversas disposiciones básicas para inducir este movimiento, entre ellas:
 - Una variación de la ventilación cruzada consistente en que la abertura de entrada se orienta a un espacio abierto sombreado mediante arbolado, pérgolas, o similares, y la abertura de salida se orienta a un espacio abierto soleado. Como el aire que está en contacto con el piso del espacio soleado se calienta, disminu-

ye su densidad, se eleva y entonces induce a circular aire proveniente del patio sombreado que estará necesariamente más fresco. Como las aberturas están dispuestas una frente a la otra, la corriente de aire fresco atraviesa el espacio habitable, generando sensación de frescura sobre la piel de los ocupantes.

- Cuando la abertura de salida del viento se dispone por arriba de la abertura de entrada, configuración conocida como efecto *stack* o termosifón, que aprovecha también la propiedad de que el aire caliente es más ligero que el aire frío por lo que tiende a subir. En este caso, el aire se calienta por contacto de las superficies y cuerpos en el interior del espacio habitable, sale por la parte superior y es renovado por aire menos cálido generando una sensación de frescura.
- Cuando la abertura de entrada tiene menor superficie que la de la salida, algo que equivaldría a reducir el diámetro de una manguera, por lo que la corriente de viento se acelera y por lo tanto transporta más calor por convección. Este recurso puede aplicarse a un par de ventanas (una pequeña y otra grande) o sólo a una, abocinando su sección de tal manera que la parte externa de la ventana es más reducida que la interna. Este efecto se conoce como *Venturi*.
- Cuando el flujo de ventilación se hace pasar a través de un tubo subterráneo, configuración conocida como pozo canadiense o pozo provenzal (*Canadian well, Provençal well*), que aprovecha la inercia térmica del subsuelo. A medida que la profundidad aumenta, la oscilación térmica del subsuelo se reduce hasta llegar a una condición estable, muy cercana a la temperatura

promedio del aire exterior.⁵⁹ Así, a una profundidad adecuada, la temperatura del subsuelo resulta fresca para periodos cálidos y tibia para periodos fríos. De esta forma, el tubo gana o cede calor por su contacto con el subsuelo y transmite ese efecto al aire. Este sería el único caso de ventilación inducida que podría ser aprovechado también en climas fríos. Una limitante de esta solución, para efectos de enfriamiento, es que el flujo de aire refrescado tendría que subir al espacio habitable, lo cual sólo puede ocurrir con apoyo mecánico, ya sea mediante extractores eólicos (u otras formas de extracción a base de energías pasivas) o mediante extractores a base de energías activas.

- c. El enfriamiento evaporativo directo, que consiste en hacer pasar la corriente de viento por un volumen de agua, ya sea atomizado o bien a base de gotas, chorros o cascadas, haciendo que el aire incremente su humedad por efecto de evaporar esas moléculas de agua líquida. El cambio de estado de líquido a gaseoso hace que el aire pierda temperatura ya que para evaporar le tuvo que ceder calor al agua, sin embargo, esto ocurre sólo si la humedad natural del aire es lo suficientemente baja para que la mezcla atmosférica pueda incorporar nuevas moléculas de vapor de agua. Por lo tanto, este recurso sólo es aplicable a climas secos y semiáridos.
- d. El enfriamiento evaporativo indirecto, en el que la corriente de viento no atraviesa ningún cuerpo o corriente de agua, con lo que no incrementa su humedad natural. En este

59. Mahach et al. (2021) reportan que a 6.4 m de profundidad la oscilación térmica del subsuelo, en una región árida, es mínima, prácticamente nula. Sin embargo, se puede apreciar que ya a 1.5 de profundidad, la oscilación registrada (9 K contra 2 4 K del aire exterior) ofrece un buen margen de aprovechamiento.

caso, aunque la humedad natural del sitio no es limitante, y por lo tanto puede ser aplicado en climas subhúmedos, el resultado es más eficaz en la medida de que el ambiente sea más seco. Existen diversas alternativas de este tipo de enfriamiento evaporativo aplicables al diseño de edificios:

- La disposición de cuerpos de agua sombreados sobre la cubierta, sistema conocido como techo estanque (*pool roof*). El agua al no recibir la radiación solar de manera directa se mantiene a temperaturas menores que la del edificio, por lo que el contacto de éste con el agua ayuda a la pérdida de calor a través de su evaporación. El efecto se puede potenciar si el agua contiene fibra textil (pequeños fragmentos o incluso lienzos de yute, por ejemplo) flotando en la superficie (Esparza-López, Gómez-Amador, Escobar, Elizondo, & Gómez-Azpeitia, 2016).
- Una variación del recurso anterior consiste en un depósito de agua colocado a la sombra, pero no necesariamente sobre la cubierta. El aire por climatizar se hace pasar rozando las paredes del depósito, las cuales deben ser de un material de alta conductividad térmica —de preferencia metal, pero en ejemplos de arquitectura popular funciona también con vasijas de barro—, por lo que el aire pierde temperatura al ceder calor a las paredes del depósito, y éste a su vez al agua.
- Una variante más consiste en que el depósito de agua se encuentra subterráneo y el aire a climatizar se canaliza por un tubo que atraviesa el cuerpo de agua. En este caso, son las paredes del conducto de aire las que deben ser de alta conductividad térmica. El proceso es similar al caso anterior: el aire cede calor a las paredes del tubo y éste finalmente al agua. Esta solución impli-

ca la misma limitante que la del *pozo canadiense* consistente en que se requiere apoyo mecánico (extractores a base de energías pasivas o activas) para ascender el flujo de aire refrescado.

- Cuando no es posible disponer de depósitos de agua —por motivos económicos principalmente, pero también por seguridad estructural o por falta de espacio o disponibilidad del líquido— se puede recurrir a las propiedades térmicas del agua en volúmenes pequeños. Una posibilidad es el riego de las azoteas al caer la tarde, con lo que el calor ganado durante el día se transfiere a las gotas de agua que tocan la superficie, en vez de transmitirse al interior del edificio a través de la cubierta.
- Una variante de la solución anterior consiste en disponer sobre la cubierta del edificio, lienzos húmedos de fibra textil, con lo que el agua tarda más en evaporarse y por lo tanto prolonga el proceso de absorción de calor, sin afectar la estructura de la cubierta con el peso que un depósito de agua implicaría (Esparza-López, Gómez-Amador, Escobar, Elizondo, & Gómez-Azpeitia, 2016).

La radiación es una forma de transmitir el calor que no depende del contacto entre las moléculas de los sistemas y su entorno, ni precisa de un fluido como intermediario, sino que puede llevarse a cabo en condiciones de vacío —como, por ejemplo, en el espacio sideral, razón por la que el calor del Sol puede llegar a la Tierra—. El mecanismo de transmisión se realiza a través de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes⁶⁰. De acuerdo con la ley de Planck, la intensidad de la energía radiante que emite una

60. Además del movimiento ondulatorio que plantea la física clásica, desde la perspectiva de la física cuántica se consideran también partículas subatómicas —por ejemplo, fotones— como parte de esta modalidad de transmisión.

superficie cualquiera varía según su frecuencia de vibración y su temperatura. Para explicar su planteamiento, se valió de un objeto imaginario que denominó “cuerpo negro perfecto” o “cuerpo negro teórico”, el cual sería capaz de absorber la totalidad de energía radiante que incide sobre él y, una vez alcanzado el balance térmico, de reemitirla tan rápido como fue absorbida (Britannica, Planck’s radiation law, 2020)⁶¹.

Por su parte, la ley de la radiación térmica de Kirchhoff propone que la velocidad a la que un cuerpo irradia o absorbe radiación térmica depende también de la naturaleza de su superficie. En consecuencia, asume un paralelismo entre la capacidad de los objetos de irradiar y absorber energía, de tal manera que los cuerpos que son buenos emisores también son buenos absorbentes. Así, cualquier superficie suficientemente oscura —cercana en apariencia al “cuerpo negro perfecto”—resulta ser un excelente emisor y también un excelente absorbente. Por el contrario, si la superficie es sumamente clara o tiene características reflejantes —cercana en apariencia a un “espejo perfecto”—, absorbería escasa energía e igualmente reemitiría con poca eficiencia (Britannica, 2018) (Méndez-Pérez, 2015)

Entre el “cuerpo negro perfecto” (que absorbe y reemite toda la radiación incidente) y el “espejo perfecto” (que refleja toda la radiación incidente y por lo tanto ni la absorbe ni la reemite) estarían todos los cuerpos reales, incluyendo edificios, personas, objetos, etc. que componen el mundo habitable. Así, dependiendo de su color⁶² y temperatura, cabría esperar un determinado compor-

61. La formulación matemática se complementa con la ley de Stefan-Boltzmann que establece que la energía radiante emitida por una superficie es directamente proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia (Britannica, 2018).

62. El color que percibe nuestro cerebro es resultado de la frecuencia de vibración de las moléculas de la superficie. Los colores del espectro visible tienen una longitud de onda de entre 400 y 700 nm. Longitudes menores a 400 nm constituyen el espectro Ultravioleta, que no percibimos, y mayores a 700 nm comprenden el espectro infra-

tamiento de energía radiante: entre más oscuro sea, más fácilmente se calentaría y reemitiría el calor ganado; por el contrario, entre más clara y/o reflejante sea su superficie, más difícilmente ganaría calor y menos eficiente sería la reemisión del calor ganado.

Así pues, todas las soluciones arquitectónicas que toman como recurso esta forma de transmisión del calor, tienen que ver con el color, la textura y la consistencia de las superficies a donde incide la radiación solar. Entre estas soluciones se pueden destacar las siguientes:

- a. El invernadero, que como es bien sabido consiste en cubiertas de cristal o vidrio, o cualquier sustancia transparente a la mayor parte de las longitudes de onda del espectro solar, pero opaco para la radiación calórica o infrarroja (de 750 a 1000 nm de longitud de onda). De esta forma, entra libremente la radiación solar al espacio habitable, pero el calor queda atrapado dentro, con lo que propicia una calefacción natural muy apreciada en los climas fríos. Este mismo efecto ocurre en ventanas acristaladas expuestas al sol, aunque su eficiencia varía en función del ángulo de incidencia del sol.
- b. Elementos arquitectónicos funcionando como colectores solares que reciben la radiación solar y luego la reemiten como radiación infrarroja. Para que ese efecto ocurra, es necesario que los colectores estén constituidos de materiales densos y masivos. Si la re-radiación infrarroja se dirige al interior de los espacios habitados, se trata de un sistema de calefacción pasiva. Existen varias soluciones arquitectónicas que buscan este efecto:
 - Aplicación de colores oscuros en las fachadas, mediante lo cual la masa de los muros masivos puede coleccionar una buena cantidad de la energía recibida durante el

rojo, que no vemos, pero en el caso del calor, sí lo sentimos.

día, para luego reemitirla al interior durante la noche, aprovechando también el efecto de retraso térmico.

- Una sofisticación de los muros colectores oscuros es el dispositivo conocido como muro *Trombe*⁶³. En este caso, además del muro oscuro, masivo y de espesor importante, se incluye una lámina de vidrio o cristal por delante de la cara exterior del muro, de tal manera que esa delgada cámara de aire que queda entre el cristal y la fachada se sobrecalienta por el efecto invernadero y hace más eficiente la ganancia de calor a través del muro.
- Otra forma de aprovechar la capacidad calorífica de los materiales densos es el sistema conocido como *radiant floor* o piso radiante. Se trata de losas de concreto en pisos y entrepisos, en donde se alojan largas tuberías que conducen un fluido previamente calentado —puede ser aire, aunque es más frecuente el uso de agua—. La idea es que el fluido alcance altas temperaturas, que ceden energía por convección a las paredes interiores del tubo, y una vez calentado éste, transmite la energía por conducción a la masa de concreto. Cuando ésta se calienta lo suficiente, reemite por medio de radiación de onda larga el calor al espacio habitable. Sólo cuando la fuente de energía que calienta el fluido proviene de la radiación solar directa, se puede considerar este sistema como pasivo.

Cuando la re-radiación infrarroja se dirige hacia afuera, constituye un sistema de refrigeración o enfriamiento pasivo, que

63. Este dispositivo fue patentado en 1881 por Edward Morse en los Estados Unidos de América, pero no tuvo mayor aceptación. Fue hasta los años sesenta del siglo XX que fue aplicado con éxito en Francia, por parte del ingeniero Félix Trombe y del arquitecto Jaques Michel. A partir de entonces se popularizó por el mundo. También es conocido como muro Trombe-Michel (Alter, 2018).

transfiere la energía recibida durante el día, hacia la atmósfera y, en última instancia, hacia el espacio exterior. Así, por emisión de radiación, la masa del edificio se enfría rápidamente. Este fenómeno sólo ocurre en ausencia de radiación solar, por lo que se le conoce como *re-radiación nocturna*. La presencia de nubes en la atmósfera reduce de manera drástica la eficiencia del sistema, por lo que es poco útil en climas o temporadas extremadamente húmedos y/o nublados.

- a. Pérgolas, aleros — *las losas-visera* de Vladimiro Acosta—, celosías, quiebra-soles —los *brise-soleil* de *Le Corbusier*—, toldos, sobrecubiertas, cortinas y cualquier otro elemento opaco que se interpone a la radiación solar y evita la incidencia sobre la superficie del edificio o del cristal de una ventana, bloqueando la ganancia de radiación. Podría decirse que se trata de una forma de aislamiento radiativo por obstrucción. Este es un recurso muy utilizado en climas cálidos.
- b. Otra forma de aislamiento radiativo consiste en dar un terminado específico a las superficies externas del edificio, ya sea por color o por textura, a fin de que puedan reflejar una determinada porción de la radiación incidente y con ello evitar la ganancia de calor excesiva durante los periodos cálidos. Por ello podría denominarse *aislamiento radiativo por reflexión*. Existen diferentes aplicaciones arquitectónicas que se valen de este recurso:
 - Los cristales reflejantes cuya alta reflectividad puede reducir en más de un 90% la absorción de energía, con lo que la ganancia de calor hacia el interior prácticamente se anula. Sin embargo, presentan varias desventajas. Por ejemplo, reducen la transmisión de luz visible para efectos de iluminación. Por otra parte, los edificios circundantes y el medio urbano cercano, reci-

ben la radiación reflejada causando molestias visuales y térmicas.

- El *cool roof* o techo frío, que consiste en que la superficie externa de la cubierta está pintada de blanco, por lo que podría esperarse una reflexión superior al 80% de la radiación recibida —dependiendo de la tonalidad del blanco— y por lo tanto muy poco calor absorbido. Esta solución puede aplicarse también en los muros exteriores.
- Pigmentos termo-crómicos o *thermocolor*, que cambian de color según su temperatura, con el fin de absorber calor en periodos fríos o reflejarlo en periodos cálidos. Estos pigmentos son mezclas orgánicas de leuco-colorantes, que integran tres componentes básicos: un formador —por lo regular éster cíclico— que determina el color del producto final en su estado coloreado; un revelador —usualmente un ácido débil— que determina la intensidad del color y permite la reversibilidad termo-crómica; y un solvente —generalmente alcohol o éster— que controla la temperatura de transición a la que se produce el cambio de color. Con el fin de mantener en buen estado las propiedades termo-crómicas del pigmento, la mezcla se aplica en cápsulas microscópicas que sirven como barrera a los agentes químicos del entorno y a las condiciones climáticas (Karlessi, Santamouris, Apostolakis, Synnefa, & Livada, 2009). Estos pigmentos, al aplicarse a las fachadas y otros elementos del edificio, funcionan como un controlador del intercambio de calor radiante para climas cuyo desempeño sea muy variable a lo largo del día o en las diferentes temporadas del año, como por ejemplo los climas desérticos.

Propiedades físicas de materiales y superficies

Como se aprecia en el apartado previo, el buen desempeño del edificio en cuanto a la transmisión del calor depende en gran medida de las propiedades físicas de los materiales, sistemas constructivos y acabados de superficie que lo componen. De ahí que sea un tema de especial interés para los diseñadores de arquitectura. Tales propiedades pueden agruparse en cuando menos dos grandes categorías: propiedades térmicas, que atañen a los flujos de calor por conducción y convección, y propiedades radiantes, que, como su nombre lo dice, corresponden al flujo de calor por radiación.

Las propiedades térmicas caracterizan a sustancias, componentes y materiales, independientemente de su forma o tamaño. De cierta manera, están relacionadas con su densidad (ρ), pues entre más denso es el material, menos espacio vacío queda entre sus moléculas, y por lo tanto, más fácilmente transcurre el flujo de calor. Por el contrario, grandes huecos intermoleculares lo entorpecen.

La propiedad térmica más elemental es la *conductividad* κ . Se define como la capacidad de un material para permitir el flujo de calor que lo atraviesa desde su cara más cálida, hasta su cara más fría. Se determina como la energía térmica transferida por unidad de tiempo y por unidad de superficie, dividida por el gradiente de temperatura —la diferencia de temperatura entre las dos caras—, y por la distancia entre ellas —es decir, el espesor del material—. Se expresa, por lo tanto, en watts sobre metros por grados Kelvin (W/mK) (AH Dictionary, 2020 a.). Por simetría, su propiedad recíproca es la *resistividad* r , que alude a la dificultad que inflige al paso del calor a través del material. Su magnitud es el inverso de la conductividad y se mide en mK/W.

La conductividad (o resistividad) aplicada a un elemento constructivo, con dimensiones determinadas, es la conductancia,

transmitancia o coeficiente U (o su inverso, la resistencia, R). En este caso el espesor tiene una magnitud específica, por lo que la transmitancia de un elemento constituido por un solo material (una pared de adobe, por ejemplo) se obtiene de dividir la conductividad del material por el espesor del elemento (en m). Esta es la tasa de flujo de calor (medida en $W/m^2 K$). Cuando se trata de un elemento formado por capas de diferentes materiales (por ejemplo, una pared de tabique de cemento, una capa de aislante poroso y dos capas de revoque o aplanado de mortero o yeso), la transmitancia del elemento es la suma de las transmitancias de cada capa, a las que suelen incluirse las resistencias superficiales originadas por la película de aire que se acerca a las caras externas del sistema. (Szokolay, 2008, pág. 9).

Dado que la transmitancia U se determina por unidad de área, basta con multiplicar la superficie A que ocupa cada elemento de la envolvente para obtener su tasa de pérdida o ganancia de calor total por hora, por grado de diferencia entre las temperaturas interior y exterior. De la suma de los productos de U por A de todos los elementos de la envolvente (incluidas las ventanas) se obtiene el coeficiente de transmitancia térmica UA del edificio, cuya unidad de medida es W/K . (Givoni, 1998, pág. 116).

Otra propiedad de los materiales que es crucial para entender la termodinámica de los edificios es la llamada *capacidad calorífica* C_p , aunque el nombre sólo alude a que el flujo de calor resulta lo bastante lento y se percibe como si la energía “no fluyera”, y pareciera que “se almacena”. Esto, como se dijo antes, no es posible, sin embargo, la denominación es una convención aceptada. Se define como la relación que se establece entre la energía térmica absorbida por el material y el aumento de temperatura que genera en el mismo (AH Dictionary, 2020 b). Puede ser medido en función de la masa del material, en cuyo caso las unidades a emplear son joules sobre kilogramo de masa por grado Kelvin (J/kgK),

pero también puede ser medido en función del volumen que ocupa el material, en cuyo caso se le denomina *calor específico volumétrico* $C\rho_v$, y se mide en kilojoules sobre metro cúbico de volumen por grado Kelvin ($\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$). Otra manera de abordar esta propiedad es la denominada simplemente *calor específico* c , relativa respecto de un material de referencia. Se define como la relación que existe entre la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa (o volumen) del material y la que se requiere para elevar la temperatura de una masa (o volumen) similar del material de referencia, el cual generalmente es el agua en estado líquido y a una temperatura aproximada de $20\text{ }^\circ\text{C}$. Se expresa en fracciones decimales, correspondiendo la unidad al material de referencia: $c_{\text{agua}} = 1$ (AH Dictionary, 2020 c.).

El efecto combinado de las propiedades básicas de conductividad (κ) y el calor específico volumétrico ($C\rho_v$) originan, a su vez, dos atributos, subsidiarios, pero no menos importantes para el desempeño térmico de los edificios: la *admisividad* o *efusividad* (b) y la *difusividad* (D).

La admisividad o efusividad térmica b se entiende como la capacidad de un material para absorber y liberar la energía térmica y, por así decirlo, su capacidad de almacenamiento térmico aparente. Su efecto evoluciona en la misma dirección que la conductividad térmica κ —a mayor conductividad mayor capacidad de absorber la energía térmica— pero también en la misma dirección que el calor específico volumétrico $C\rho_v$ —mayor facilidad de absorción de energía térmica si su temperatura aumenta poco bajo el efecto del calor—. Por tanto, su magnitud se determina como el producto de la conductividad térmica por el calor específico volumétrico (Izard J. , 2006, pág. 6) y se expresa en kilojoules al cuadrado sobre segundo por metro a la cuarta y grado Kelvin al cuadrado ($\text{kJ}^2/\text{s m}^4 \text{K}^2$).

Cuando la efusividad o admisividad térmica b se aplica a un elemento o sistema constructivo con dimensiones determinadas, se obtiene la admitancia térmica Y del material o sistema. Tal concepto se interpreta como la medida de su capacidad para captar y liberar calor del interior, a medida que la temperatura cambia. La admitancia total Y_t de un edificio (o una habitación en particular) se determina mediante la suma de la admitancia Y de cada elemento, multiplicado por su área respectiva, y se mide en watts sobre grado Kelvin (W/K) —representa el flujo de energía térmica que podría absorber (o liberar) el edificio, según su gradiente térmico—. Esta propiedad es determinante para establecer el mecanismo de inercia térmica de los edificios, pues tiene una gran influencia al calcular las temperaturas interiores que resultan de los flujos de calor que lo atraviesan (Szokolay, 2008, pág. 51).

La difusividad térmica D , por su parte, expresa la capacidad y velocidad de un material para transmitir una variación de temperatura a lo largo de su volumen. En este caso, el efecto de la difusividad evoluciona en el mismo sentido que la conductividad térmica κ —a mayor conductividad mayor rapidez de transmisión—, pero en sentido inverso al calor específico volumétrico $C\rho_v$ —menor velocidad de transmisión a medida que se requiere más calor para elevar la temperatura—. Por lo tanto, su magnitud se determina como el cociente del calor específico volumétrico entre la conductividad térmica, y se expresa en metros cuadrados por segundo (m^2/s). El inverso de la difusividad, expresado en segundos, representa el tiempo en que tarda en completarse un cambio o transición de fase —por ejemplo, la condensación— en un m^2 de cualquier elemento constructivo (Izard J. , 2006, pág. 5).

En la tabla 4.2 se muestra una lista de los materiales más empleados en la construcción, con sus respectivos valores para cada una de las propiedades térmicas antes reseñadas.

Tabla 4.2 Propiedades térmicas de materiales empleados en la construcción

	Densidad ρ kg/m ³	Capacidad calorífica $C\rho$ J/kg·K	Calor específico volumétrico $C\rho_v = \frac{\left(\frac{\rho}{C\rho}\right)}{1000}$ kJ/m ³ ·K	Calor específico relativo al $C\rho$ del agua $C\rho_x = \frac{C\rho_{v_x}}{C\rho_{v_{agua}}}$ Adimensional	Conductividad κ W/m·K	Resistividad $r = \frac{1}{\kappa}$ m·K/W	Efusividad o Admisividad $b = C\rho_v(\kappa)$ k·J ² /s·m ⁴ ·K ²	Difusividad $D = \frac{C\rho_v}{\kappa(10^6)}$ 10 ⁶ ·m ² /s
Aire	1.20	1180	1.416	0.0003	0.026	38.462	0.0368	18362
Agua	1,000	4,190	4,190	1.0000	0.580	1.724	2,430	138
Hielo	930	2,060	1,916	0.4572	0.026	38.462	50	14
Rocas:								
Granito	2,700	1,030	2,781	0.6637	1.920	0.521	5340	690
Caliza	2,500	910	2,275	0.5430	1.530	0.654	3481	673
Arenisca	2,000	730	1,460	0.3484	1.290	0.775	1883	884
Arena (seca)	1,520	810	1,231	0.2938	0.500	2.000	616	406
Arcilla (seca)	1,600	800	1,280	0.3055	0.450	2.222	576	352
Adobe	1,500	1,480	2,220	0.5298	0.580	1.724	1,288	261
Yeso	700	840	588	0.1403	0.280	3.571	165	476
Mortero	2,130	890	1,896	0.4524	1.400	0.714	2,654	739
Mampostería de tabique:								
Ligero	1,600	900	1,440	0.3437	0.560	1.786	806	389
Mediano	1,800	920	1,656	0.3952	0.730	1.370	1,209	441
Denso	2,000	1,070	2,140	0.5107	0.950	1.053	2,033	444
Vermiculita	700	880	616	0.1470	0.190	5.263	117	308
Vidrio	2,600	900	2,340	0.5585	0.720	1.389	1,685	308
Asfalto	1,700	1,140	1,938	0.4625	0.580	1.724	1,124	299
Acero	7,760	460	3,570	0.8519	50.000	0.020	178,480	14,007
Aluminio	2,700	911	2,460	0.5870	200.000	0.005	491,940	81,311
Zinc	7,130	380	2,709	0.6466	110.000	0.009	298,034	40,599
Plomo	11,340	130	1,474	0.3518	340.000	0.003	501,228	230,634
Concreto en general	2,100	840	1,764	0.4210	1.000	1.000	1,764	567
Concreto con agregado:								
Ligero	1,800	1,000	1,800	0.4296	0.720	1.389	1,296	400
Medio	2,200	1,000	2,200	0.5251	1.200	0.833	2,640	545
Denso	2,400	1,000	2,400	0.5728	1.500	0.667	3,600	625
Madera	600	1,210	726	0.1733	0.140	7.143	102	193
Fibra de madera	260	1,060	276	0.0658	0.050	20.000	14	181
Triplay	580	1,400	812	0.1938	0.140	7.143	114	172
Tablero aglomerado	800	1,400	1,120	0.2673	0.150	6.667	168	134
Placa de corcho	140	1,800	252	0.0601	0.050	20.000	13	198
Lámina de asbesto	1,500	900	1,350	0.3222	0.360	2.778	486	267
Lana mineral (fieltro)	140	750	105	0.0251	0.037	27.027	3.89	352
Fibra de vidrio (manta)	100	860	86	0.0205	0.042	23.810	3.61	488
Polietileno expandido	30	1,700	51	0.0122	0.033	30.303	1.68	647

Elaborado a partir de datos tomados de Tudela (1982)

Con el propósito de comprender mejor el desempeño térmico de los diferentes materiales empleados en la construcción, se elaboró una gráfica comparativa (fig. 4.3) entre los valores relativos de cada material. Para el eje *calor específico* c , el material de referencia es el agua ($\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$, $c = 1$); para el eje *conductividad-resistividad* es el granito ($1.92 \text{ W}/\text{mK}$, conductividad relativa = 1). Los materiales se agrupan en cuatro cuadrantes:

- a. los que presentan alta resistencia al flujo de calor, capacidad calorífica alta y poca velocidad de difusión, tales como el agua líquida o el vidrio;
- b. los que presentan alta conductividad al flujo de calor, alta capacidad calorífica y alta efusividad, por ejemplo, las rocas naturales y artificiales;
- c. los que manifiestan alta resistencia al flujo de calor y poca efusividad, y si su capacidad calorífica es muy baja, cercana al cero, se trataría de materiales aislantes térmicos, pero si su capacidad calorífica es media, se trata, entonces, de mamposterías de tabique o elementos de concreto; y
- d. los que muestran una alta conductividad al flujo de calor, poca capacidad calorífica y una alta velocidad de difusión, tales como los metales.

En lo que atañe a las propiedades radiantes de las superficies, éstas son tres:

1. La reflectividad δ , también conocida como *albedo* cuando se refiere a la luz visible, es una fracción decimal que indica cuánto de la radiación incidente sobre una superficie, se refleja hacia el entorno. Un “espejo perfecto”, aquel que reflejaría la totalidad de la radiación que incide sobre él, tendría el valor máximo posible de $\delta = 1$. Las superficies de color claro presentan valores altos de a (por ejemplo, una superficie metálica blanca o pulida tendría una $\delta = 0.8$), los cuales van disminuyendo conforme se oscurece la superficie.
2. La absorptividad a , por simetría, es la propiedad recíproca y opuesta de la reflectividad (δ). Se expresa como una fracción

de la radiación absorbida por el cuerpo negro teórico, para el cual $a = 1$. Así, las superficies oscuras presentan un valor alto de a (por ejemplo, un asfalto negro tendría una $\alpha = 0.9$), el cual va descendiendo conforme se aclara la superficie. Para cualquier superficie opaca la suma de $a + \delta = 1$.

3. La emisividad (ϵ) también es una fracción decimal, que en este caso representa la capacidad de emitir una parte de la radiación que emitiría el cuerpo negro teórico. Para una superficie ordinaria $a = \epsilon$,⁶⁴ para la misma longitud de onda (o temperatura) de radiación —es decir, emite lo que absorbe—, pero muchas superficies tienen propiedades selectivas, por ejemplo, alta absorptividad para radiación solar (a 6000 °C) pero baja emisividad a temperaturas ordinarias (< 100 °C) (Szokolay, 2008, pág. 11).

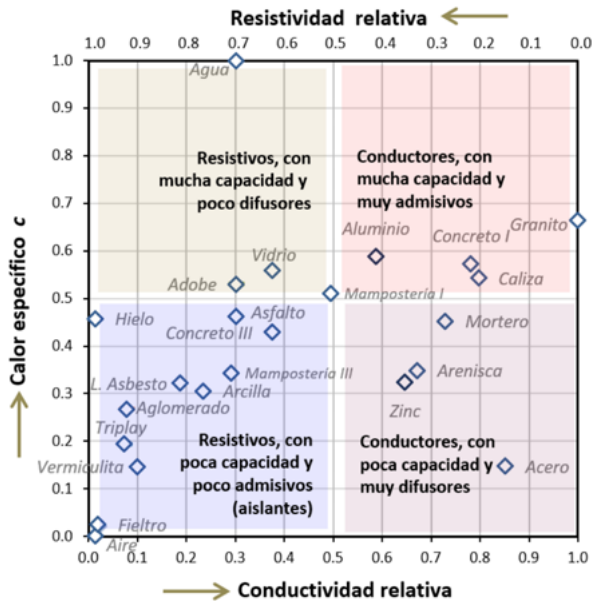


Figura 4.3 Desempeño térmico comparado de diferentes materiales empleados en la construcción. El material de referencia usado para eje *calor específico* es el agua, y para el eje *conductividad-resistividad* es el granito.

64. Ley de Kirchhoff de radiación térmica (ver apéndice A.5)

En la tabla 4.3 se muestra una lista de los colores y terminados de superficie más empleados en fachadas, con sus respectivos valores para cada una de las propiedades radiantes descritas.

Tabla 4.3 Propiedades radiantes de colores y terminados de superficie empleados en la construcción

	Absortividad a	Reflectividad o Albedo δ	Emisividad ε
Superficies metálicas:			
Aluminio brillante	0.04	0.96	0.07
Aluminio con pátina de óxido	0.40	0.60	0.35
Cromo	0.24	0.76	0.07
Cobre pulido	0.20	0.80	0.03
Hierro galvanizado	0.40	0.60	0.30
Hierro galvanizado oxidado	0.59	0.41	0.66
Superficies pétreas:			
Mármol blanco	0.46	0.54	0.95
Caliza	0.57	0.43	0.67
Granito	0.70	0.30	0.68
Construcción aparente:			
Concreto o cemento	0.53	0.48	0.92
Ladrillo de barro	0.74	0.27	0.92
Cerámica cocida	0.74	0.27	0.91
Encalado reciente	0.16	0.84	0.90
Pinturas:			
Blanco	0.25	0.76	0.93
Negro mate	0.91	0.09	0.94
Verde o gris claro	0.45	0.55	0.85
Verde o gris oscuro	0.73	0.28	0.90
Pintura de aluminio	0.48	0.53	0.48
Superficies vegetales:			
Madera	0.60	0.40	0.94

Elaborado a partir de datos tomados de Tudela (1982)

De la misma forma en que se hizo un acercamiento comparativo entre los diferentes materiales de construcción y sus propiedades térmicas, se hace lo propio en la figura 4.4 con los colores y terminados de superficie más usuales en fachadas y recubrimientos de azoteas con sus correspondientes valores de las propiedades radiantes. En este caso el terminado de superficie empleado como referencia es el cuerpo negro teórico, que se asume como un absorbedor y emisor perfecto ($\varepsilon = 1$; $a = 1$). Las superficies se agrupan también en cuatro cuadrantes:

- a. los terminados a base de colores claros, reflejantes de alta emisividad y escasa absorptividad, llamados *selectivos fríos*, pues ayudan a evitar el sobrecalentamiento del elemento del que forman parte, Se trata de revestimientos de encajado, pinturas blancas o de colores claros, incluso revestimientos de madera clara;
- b. los que se caracterizan por tener colores oscuros de alta emisividad y absorptividad, (y baja reflectividad) y por ello denominados *cuerpos negros*, apropiados para coleccionar calor solar y emitirlo al interior de los espacios mediante materiales con alta conductividad y capacidad calorífica. Se trata de superficies de colores oscuros, cercanos al negro, como el asfalto, y superficies de materiales aparentes como el tabique, la piedra o el concreto;
- c. los terminados semejantes a un espejo, muy reflejantes, pero de escasa absorptividad y emisividad, llamados *superficies reflejantes*, que no absorben calor. En esta categoría se agrupan las superficies acristaladas y los metales pulidos; y
- d. las superficies poco reflejantes, de alta absorptividad, pero escasa emisividad, denominadas *selectivas calientes*, grupo en el que no se encuentran superficies usuales en la construcción.

La tarea de adaptación del hábitat como proceso termodinámico

El desempeño térmico de las envolventes arquitectónicas depende de las condiciones del clima en la localidad, y de las propiedades térmicas y radiantes de sus elementos, como variables independientes. Así, la trayectoria diaria de la temperatura ambiente en el interior de un edificio es un reflejo de la trayectoria de la temperatura ambiente exterior, pero alterada por el efecto de las propiedades térmicas de los materiales y sistemas con que están contruidos sus diferentes componentes, que operan en un proceso termodinámico de intercambio de calor entre exterior e interior. Por eso es necesario detenernos un poco en el análisis de dichas trayectorias.

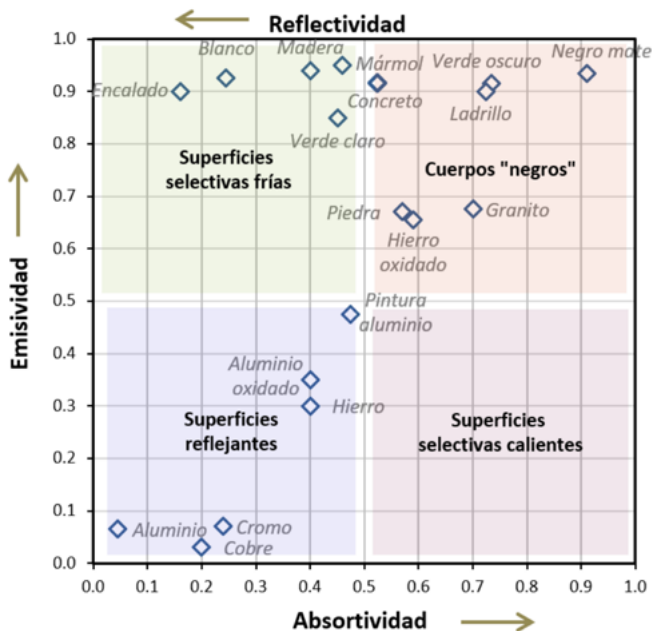


Figura 4.4. Desempeño radiante comparado de diferentes terminados de superficie y colores empleados en fachadas y recubrimientos de azotea. La superficie de referencia usada es el *cuerpo negro teórico*, como absorbedor y emisor perfecto ($\epsilon = 1$; $a = 1$).

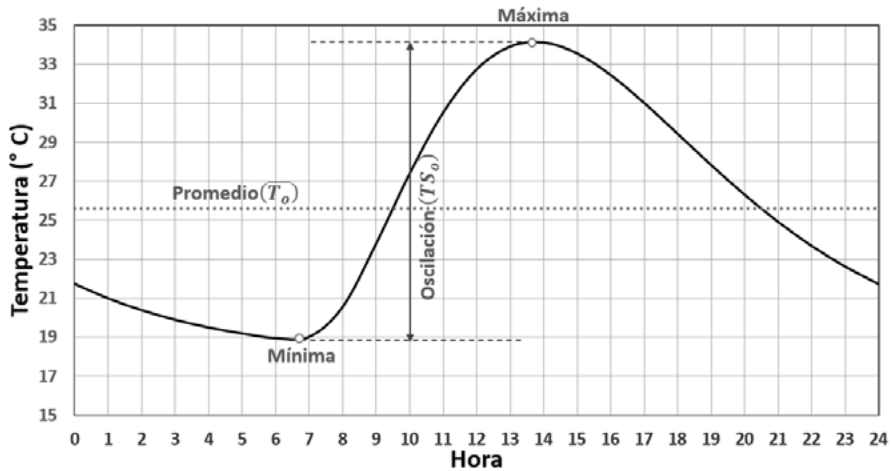


Figura 4.5. La trayectoria diaria de la temperatura ambiente exterior y sus atributos.

En la figura 4.5 se muestra la curva característica que sigue la temperatura del aire en el exterior durante un día completo. Su desarrollo es del tipo sinusoidal, cuyo valor mínimo ocurre en los momentos previos al amanecer. Al salir el sol, la mezcla atmosférica se empieza a calentar, con lo que la temperatura se eleva rápidamente y la curva aumenta su pendiente hasta llegar a su valor máximo, posterior al medio día. Entonces, al declinar el sol, el aire empieza a enfriarse, hasta llegar al día siguiente a su valor mínimo. Todo este lapso se manifiesta en la curva con una pendiente negativa y claramente más lenta que la que observó durante la mañana. Ahora bien, la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima registradas durante el día, son de capital importancia, pues su amplitud depende del tipo de clima respecto a la humedad del sitio: demasiado grande para climas secos; demasiado corta para climas húmedos. A esta diferencia se le denomina *oscilación* o *amplitud térmica* TS . La curva

muestra que la temperatura del aire va cambiando momento a momento durante todo el periodo del día, pero suele acudir-se a su valor promedio para dar una información general sobre el clima térmico del sitio. En la figura 4.5 se muestra como una línea punteada, que no representa la variabilidad constante del fenómeno, sino solamente su intensidad con respecto al eje de la temperatura. Así, conociendo la *oscilación térmica exterior* (TS_o) y la *temperatura promedio exterior* (\bar{T}_o) se puede determinar el clima al que debe responder el diseño con enfoque bioclimático.

En la figura 4.6 se ha agregado otra curva sinusoidal que corresponde a la variación de temperatura del ambiente interior de un edificio, en línea punteada. Como puede apreciarse, la trayectoria agregada presenta un contorno muy similar a la del aire exterior, con un valor mínimo y un valor máximo, como puntos de inflexión de la curva. Sin embargo, son patentes también sus diferencias: la *oscilación térmica interior* (TS_i) es más corta que la exterior y la *temperatura promedio interior* (\bar{T}_i) puede o no coincidir con la exterior (si $\bar{T}_i > \bar{T}_o$ el edificio está transmitiendo calor hacia dentro; si ocurre a la inversa, entonces el edificio cuenta con un sistema de enfriamiento, ya sea pasivo o activo, que transfiere calor hacia el exterior). En virtud de que es menor que , existe una diferencia entre los valores máximos y mínimos de cada una de las curvas. Así, la relación entre la máxima exterior y la máxima interior —o la mínima exterior y la mínima interior— es la magnitud con que el sistema termodinámico del edificio atenúa los valores extremos que ocurren afuera, ya sea para calor o para frío. Esta relación recibe el nombre de *amortiguamiento* o *decremento térmico* $\mu = TS_i/TS_o$. También puede verse que los momentos de máxima y mínima temperaturas al interior, no son simultáneos a los de la curva exterior, sino que ocurren un tiempo después. Este efecto se conoce como *desfase* o *retraso térmico* ϕ .

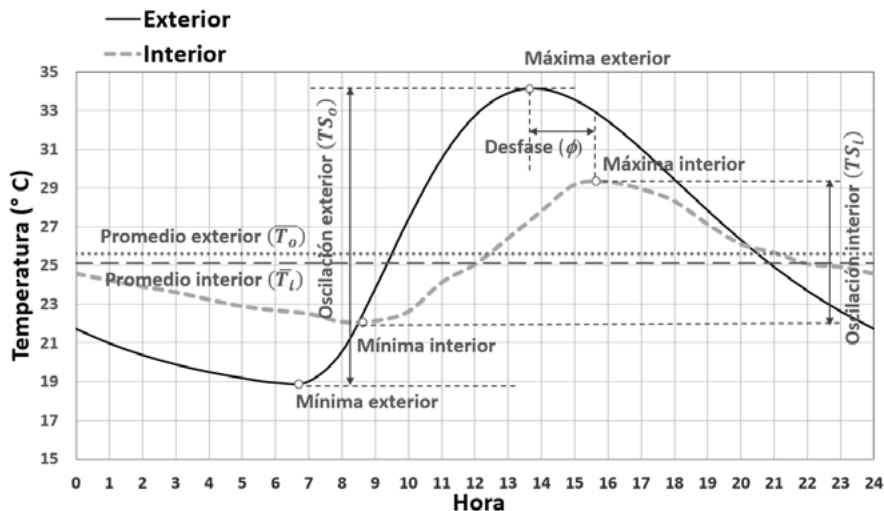


Figura 4.6. La trayectoria de la temperatura interior (T_i), sus atributos y su relación con la temperatura exterior (T_o).

Las diferencias entre la trayectoria de temperaturas al interior con respecto de la exterior obedecen, como ya se dijo, a las propiedades térmicas y radiantes de los componentes del edificio, pero de manera muy destacada a la inercia térmica que la masa del edificio presenta a la variación de temperaturas, derivada de la capacidad calorífica y la efusividad de los materiales y sistemas constructivos. Para comprender el proceso de la inercia térmica se deben considerar no sólo los muros de la envolvente exterior de un edificio que sirven de interfaz al flujo de calor entre el exterior y el interior, sino que deben considerarse también los muros internos, que no reciben radiación solar ni establecen intercambio alguno con el exterior. Así, se reconocen dos tipos de inercia térmica:

- a. la llamada *de transmisión*, que se opone a las variaciones de temperatura exterior y a los efectos térmicos que genera la energía solar absorbida a través de la cara exterior de las paredes envolventes; y

- b. la denominada *por absorción*, que se opone a las variaciones térmicas internas debidas a fuentes intermitentes de calor interno, tales como la disipación de calor de ocupantes, equipos eléctricos o efectos de la penetración solar directa. Reside principalmente en las paredes internas, pisos y superficies de intercambio en el aire interior (Izard & Vlemincx, 2006, pág. 7).

Bajo esta consideración, es la estructura constructiva del edificio en su totalidad la que está involucrada, y por lo tanto mientras mayor sea la masa que contiene el edificio, mayor será su inercia a los cambios de temperatura, independientemente de los flujos de calor que dan origen a su variabilidad (Izard J. , 2006, pág. 2). Lo importante para el diseño con enfoque bioclimático estriba en que el principal efecto de la inercia térmica es reducir la amplitud de las temperaturas internas (TS_i) en relación con la amplitud de las temperaturas externas (TS_o), es decir, amortiguar las condiciones extremas que pueden ocurrir en el exterior (Izard J. , 2006, pág. 11). Y este efecto es precisamente la tarea de adaptación del hábitat que fue desarrollada en el capítulo 3 de este libro.

En la figura 4.7 se ilustra ese propósito fundamental de la bioclimática. Ahí se muestran las curvas de temperatura diaria interior de tres tipos de edificación con diferente masa térmica, a saber:

- a. edificación masiva, con muros de adobe de 35 cm de espesor y cubierta vegetal;
- b. edificación con masa intermedia, consistente en muros de tabique sólido de cemento de 15 cm de espesor y cubierta a base de losa llena de concreto reforzado de 10 cm de espesor; y

- c. edificación ligera, con paredes de bajareque y cubierta de hojas de palma.

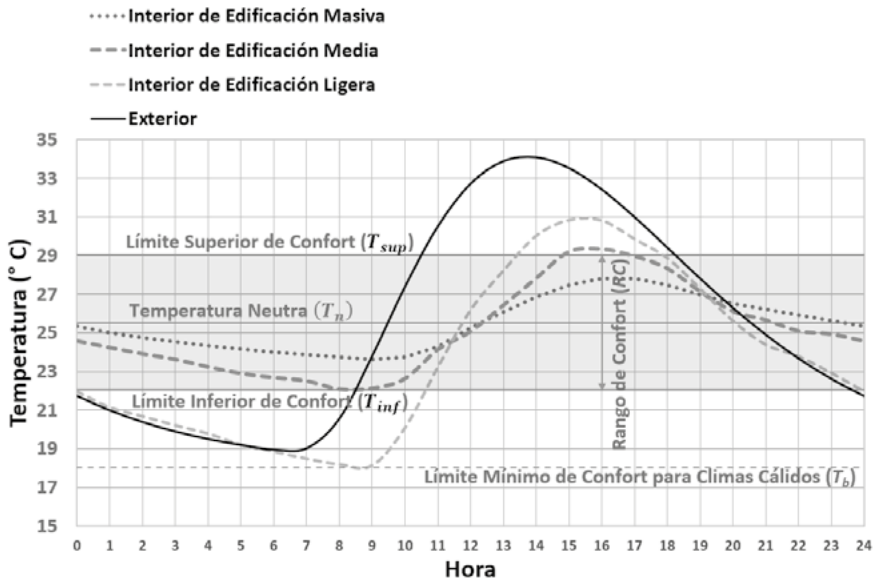


Figura 4.7 La trayectoria de la temperatura interior (T_i) de edificaciones con diferente masa térmica y su relación con la temperatura exterior (T_o).

Ahí se puede observar con facilidad la manera en que dichas trayectorias varían con respecto de la temperatura exterior. En la medida que aumenta la masa, disminuye la oscilación térmica y se retrasa la ocurrencia de los valores máximos y mínimos, es decir, aumenta el desfase térmico. La figura 4.7 también contiene un rango de confort (RC) de 7 K (± 3.5 K respecto de la temperatura neutra T_n , estimada a partir de la \bar{T}_o), en cuyas condiciones se esperaría un nivel de aceptación del 80% (ANSI/ASHRAE, 2017, págs. 12-14). Resulta aleccionador observar cómo las diferentes curvas se ajustan o no a esta franja:

- a. al exterior, la mayor parte de las horas del día presentan temperaturas fuera de la zona de confort;

- b. algo similar ocurre con la curva correspondiente a la construcción ligera, donde se cuentan casi once horas por abajo de la zona de confort⁶⁵ y cuando menos cuatro horas después del mediodía, con temperaturas que pueden generar malestar por sobrecalentamiento;
- c. en cambio, la curva de la edificación con masa intermedia se ajusta casi en su totalidad a la franja de confort, y solamente durante una hora registra temperaturas ligeramente por encima del límite superior de confort;
- d. y finalmente, la curva de la edificación masiva se aloja en su totalidad dentro de los límites de la zona de confort.

Como conclusión podemos decir que si el ajuste de la trayectoria de temperaturas al interior de un edificio respecto de los límites de confort depende en gran medida de las propiedades térmicas y radiantes de materiales, acabados y sistemas de construcción, estos últimos, así como sus dimensiones y configuración, son una decisión directa de quienes lo diseñan. De ahí la importancia de incorporar a la termodinámica al arsenal de saberes y destrezas de arquitectos y diseñadores.

4.1.5 De la teoría a la práctica

El salto de los conceptos y nociones teóricas que dan sustento al análisis climático y al diagnóstico bioclimático —expresadas en términos de datos, caracterizaciones, requerimientos y estrategias emanadas de las fases uno y dos del método— a su aplicación práctica en términos de decisiones de diseño y atributos formales del anteproyecto, aparenta ser un tanto difícil, pero con la expe-

65. Si bien este periodo queda fuera de la zona de confort, e incluso la temperatura mínima interior es aún más baja que la exterior, puede considerarse que no es una situación crítica de acuerdo al criterio de temperatura base para el cálculo de la Horas-Grado KH de calefacción, para climas cálidos, que es de 18 °C (Szokolay, 2008, págs. 32-33 y 129), es decir, no requiere de calefacción adicional (véase el capítulo 3 de este libro).

riencia, y el acopio de prácticas exitosas, el proceso se torna sin mayores complicaciones.

Una vía para adquirir parte de esa experiencia consiste en documentar, analizar y reflexionar las soluciones arquitectónicas exitosas recientes o realizadas en épocas anteriores, ya sea para el sitio que nos ocupa, o bien para otros lugares, pero de clima similar. En este sentido el saber popular materializado en pautas de arquitectura vernácula o de tradiciones arquitectónicas históricas, tanto como el conocimiento científico plasmado en proyectos recientes, son recursos valiosos para acelerar la curva de aprendizaje del proyectista.

Sin embargo, existen también herramientas que han sido desarrolladas para facilitar este proceso de avanzar del concepto a la forma. De entre ellas destacan dos —incorporadas a *bioclimarq*—, las tablas de Mahoney y los coeficientes de Serra & Coch. Ambos instrumentos se expresan en forma de recomendaciones a la forma, consistencia y disposición de espacios y elementos arquitectónicos, como resultado de rutinas de selección a partir de datos de clima y de requerimientos de confort térmico.

Las Tablas de Mahoney

Esta herramienta consiste en un conjunto de tablas de referencia, cuyo concepto inicial fue desarrollado por Carl Mahoney —de quien toman su nombre—, como parte de un encargo de la Asociación Internacional de Fomento del Banco Mundial para mejorar la educación secundaria en Nigeria (Carl Mahoney and Associates, 2002). Su principal característica es que cualquier persona, aunque no tenga conocimientos previos de arquitectura, puede utilizarlas y obtener recomendaciones prácticas para decidir las características de su vivienda, escuela o lugar de trabajo. En su forma definitiva contó con la colaboración decisiva de Otto Kö-

nigsberger y John Martin Evans, quienes, junto con Mahoney, las publicaron por primera vez con el auspicio del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (Königsberger, Mahoney, & Evans, *Climate and House Design*, 1971). Pronto aparecieron ediciones en francés y español, y en 1974 se incluyeron en el libro *Manual of Tropical Housing and Building* (Königsberger O. , Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, *Manual of Tropical Housing and Building*, 1974) que fue ampliamente distribuido por el mundo.⁶⁶

El procedimiento consiste en una secuencia de rutinas que se aplican de manera similar al llenado de una encuesta o formulario, casi como un crucigrama, a diferencia del análisis térmico detallado o la simulación virtual que realizan los expertos. Cumple con dos propósitos básicos, el análisis bioclimático del sitio y la determinación de estrategias de diseño apropiadas al clima.

El instrumento se compone de cuatro tablas, la primera para el análisis del clima, la segunda para el diagnóstico bioclimático y las dos últimas para establecer las recomendaciones de diseño arquitectónico inherentes al caso de estudio.

En la primera tabla se registran los datos generales del sitio—nombre y coordenadas geográficas—, así como los datos mensuales de:

- temperatura máxima, mínima y oscilación térmica;
- humedad relativa máxima, mínima y promedio;
- precipitación pluvial promedio; y
- direcciones prevalente y secundaria del viento.⁶⁷

66. Existe una edición en español (Königsberger O. H., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 1977), pero no es fácil de conseguir hoy en día. En cambio, la versión india (en inglés) puede descargarse de: https://www.academia.edu/30105808/Manualoftropicalhousing_koenigsberger_150824122547_lva1_app

67. Para la descripción de las tablas y su manejo, se tomó como fuente básica la publicación de Königsberger *et alter* (2013, págs. 262-269 y 285-287)

Posteriormente se dan instrucciones para realizar unos cálculos simples. En primer lugar, se identifica el valor máximo y el mínimo de los 24 datos de temperatura registrados. Ambos datos se suman y se dividen por dos, para determinar la temperatura promedio anual. Igualmente, se realiza una resta de la temperatura máxima menos la mínima, para obtener la oscilación térmica promedio anual. Por su parte, los doce datos de lluvia registrados se suman para obtener la precipitación pluvial total anual.

Conforme a los valores calculados de temperatura promedio anual, se establece el grupo de temperatura al que corresponde el clima analizado. Hay tres opciones posibles:

- A. Clima caluroso, cuando la temperatura promedio anual supera los 20 °C;
- B. Clima templado, si la temperatura promedio anual se encuentra entre 15 y 20 °C; y
- C. Clima frío, cuando la temperatura promedio anual es inferior a 15 °C.

En cuanto a los valores de humedad relativa registrados, se determina el Grupo de Humedad que corresponda a cada mes, de acuerdo con las siguientes cuatro categorías posibles:

- 1. Condiciones de humedad muy baja, cuando la humedad relativa promedio es inferior al 30%, situación excepcional, raramente encontrada en la práctica;
- 2. Condiciones de humedad baja, si la humedad relativa promedio se encuentra entre el 30 y 50%, corresponde a ambientes desérticos;
- 3. Condiciones de humedad intermedias, cuando la humedad relativa promedio se ubica entre 50 y 70%; y
- 4. Condiciones de humedad altas, si la humedad relativa promedio supera los 70%, correspondiente a zonas ecuatoriales.

Una vez clasificado el clima del sitio se procede a realizar el diagnóstico bioclimático en la tabla número dos.

Vale la pena destacar una particularidad relevante de las tablas de Mahoney, que consiste en la consideración de dos rangos de confort térmico diferentes para un mismo día, uno para las condiciones diurnas y otro para las nocturnas, a diferencia de las zonas de confort propuestas por Olgay y Givoni, que determinan dos situaciones también, pero en función de la época del año, ya sea verano o invierno. En el caso de Mahoney, la variación de la sensación térmica en el día y en la noche, responde a las diferencias en el nivel de actividad física, el tipo de ropa portado, así como a las expectativas en diferentes horas del día (Evans, 2007, pág. 96).

Con esas consideraciones y a partir de los grupos de temperatura y humedad correspondientes, se establece el rango de confort térmico aplicable a cada periodo —diurno o nocturno— de cada mes (tabla. 4.4).

Tabla 4.4 Rangos de confort diurno y nocturno, conforme a los grupos de temperatura y humedad, según las tablas de Mahoney.

Grupo de Humedad	Grupo de Temperatura					
	A		B		C	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Fuente: Königsberger O., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay (2013, pág. 264)

Una vez establecido el rango de confort térmico diurno y nocturno para cada mes, se compara con los valores correspondientes de temperatura máxima y mínima, y se evalúa si las condi-

ciones pueden considerarse de estrés o de bienestar térmico. Para este proceso, se plantean tres posibles situaciones:

- C. Condiciones calurosas, cuando la temperatura máxima del periodo está por encima del límite superior de confort;
- F. Condiciones frías, cuando la temperatura mínima del periodo se ubica por abajo del límite inferior de confort; y
- O. Condiciones neutras, cuando no se cumplen las limitaciones anteriores.

Así, se tiene un par de diagnósticos para cada mes (uno diurno y otro nocturno), con lo que se procede en seguida a determinar los indicadores de clima húmedo (H) o clima árido (A), según corresponda. Para cada grupo se plantean tres posibles situaciones, las cuales se determinan según el diagnóstico bioclimático obtenido, la precipitación pluvial anual, el grupo de humedad asignado y la magnitud de la oscilación térmica anual, de conformidad con los criterios que se muestran en la tabla 4.5. Ahí mismo se establece para cada indicador las acciones remediales más apropiadas para el diseño del edificio, a manera de estrategias básicas concernientes a la ventilación (esencial o deseable), la masa térmica de la envolvente, la protección contra el frío o la lluvia y la localización de espacios para el reposo nocturno.

De esta forma, a cada mes le debe corresponder uno o más de los indicadores y por lo tanto su estrategia de adecuación al clima. El procedimiento siguiente consiste en sumar cuántos meses cumplen los supuestos para cada indicador (tabla 46).

En las dos últimas tablas se determinan los criterios de diseño apropiados, en función al diagnóstico realizado, mediante un ejercicio de selección y descarte, según el número de meses con diferentes indicadores. Por razones prácticas relacionadas con el proceso de toma de decisiones en el diseño, las recomendaciones se dividieron en dos grupos: la etapa de diseño de bocetos para las decisiones iniciales, contenidas en la tabla número 3; y la etapa

de diseño detallado con indicaciones para los componentes del edificio, en la tabla número 4 (Evans, 2007, pág. 97).

Tabla 4.5 Indicadores de aridez y humedad definidos en las tablas de Mahoney. C = condiciones calientes; F = condiciones frías; O indica condiciones neutras (ni frío ni calor).

Indicador		Condiciones					Estrategias básicas
		Diagnóstico bioclimático		Precipitación anual	Grupo de Humedad	Oscilación térmica anual	
		Diurno	Nocturno				
Humedad	H1	C			4		Propiciar el movimiento de aire de manera esencial
		C			2 o 3	< 10 °C	
	H2	O			4		Plantear la posibilidad de movimiento de aire
	H3			> 200 mm.			Necesidad de protección contra la lluvia en áreas de circulación
Aridez	A1				1, 2 o 3	>10 °C	Proveer a la masa del edificio capacidad térmica necesaria.
	A2		C		1 o 2		Plantear la posibilidad de dormir al exterior
		C	O		1 o 2	>10 °C	
A3	F						Proteger del frío los espacios habitables

Fuente: Basado en Königsberger O., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay (2013, pág. 265)

Tabla 4.6 Tabla 2 de Mahoney (segunda parte).
Indicadores de humedad y aridez por mes y total. Ejemplo.

Indicadores:		Meses:												Totales
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Humedad:	H1													0
	H2													0
	H3													0
Aridez:	A1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	A2					x	x	x	x	x				5
	A3	x	x	x										4

Fuente: Königsberger O., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay (2013, pág. 265)

Los temas que aborda la tercera tabla de Mahoney incluyen la configuración en planta y el espaciamiento entre edificios, la organización espacial interna para efectos de ventilación, la proporción de vanos, la consistencia de muros y cubiertas, el uso de espacios exteriores y la protección contra la lluvia (Tabla. 4.7). Por su parte, la tabla 4 contiene recomendaciones sobre el tamaño y posición de los vanos, la protección necesaria para los vanos, la consistencia de muros, pisos y cubiertas, y características de los espacios exteriores (Tabla. 48). Si bien ambas tablas responden al perfil climático que se define en la tabla número uno, así como al diagnóstico bioclimático de la tabla número dos, pudieran presentarse discrepancias entre las recomendaciones de cada una de ellas. De ser así, el criterio conducente es que lo expuesto en la última tabla es lo que debe prevalecer (Königsberger O. , Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 2013, pág. 286).

Tras el llenado minucioso de las cuatro tablas, el usuario puede obtener una orientación detallada acerca de las características

que debe reunir cualquier edificio para adaptarse al clima, y proceder con conocimiento de causa al proceso de diseño. Es tan sencilla su aplicación y a la vez tan claras sus recomendaciones, que las tablas de Mahoney siguen manteniendo su vigencia después de cinco décadas.

Tabla 4.7 Tabla 3 de Mahoney. Recomendaciones para la adecuación al clima en la fase inicial del diseño.

Indicadores totales de la tabla 2					
H1	H2	H3	A1	A2	A3

Totales

			0-10		
			11-12		5-12
					0.4

Disposición en planta

1	Orientación norte y sur (eje largo este-oeste)
2	Planta compacta con patio

11-12					
2-10					
0-1					

Distribución espacial

3	Espacios abiertos para penetración de brisa
4	Igual pero protegidos contra viento frío o caliente
5	Disposición compacta de los espacios

3-12					
1-2			0-5		
			6-12		
0	2-12				
	0-1				

Movimiento del aire (ventilación)

6	Habitaciones individuales agrupadas, con permanente provisión de ventilación
7	Habitaciones en doble crujía, con provisión temporal de ventilación
8	Sin ventilación requerida

			0-1		0
			11-12		0-1
Cualquier otra condición					

Aberturas

9	Aberturas grandes, 40-80 % (del área de fachada)
10	Aberturas muy pequeñas, 10-20 %
11	Aberturas medianas, 20-40 %

			0-2		
			3-12		

Muros

12	Muros ligeros, desfase térmico de corta duración
13	Muros internos y externos masivos

			0-5		
			6-12		

Cubiertas

14	Cubiertas ligeras, con aislamiento térmico
15	Cubiertas masivas, con más de 8 h. de desfase térmico

			2-12		
--	--	--	------	--	--

Dormir al exterior

16	Espacio exterior para dormir requerido
----	--

		3-12			
--	--	------	--	--	--

Protección contra la lluvia

17	Necesaria protección contra lluvias fuertes
----	---

Fuente: Königsberger O., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay (2013, pág. 267)

Tabla 4.8 Tabla 4 de Mahoney. Recomendaciones para la adecuación al clima en la fase de proyecto.

Indicadores totales de la tabla 2					
H1	H2	H3	A1	A2	A3

Totales

		0-1			0 1-12
		2-5			
		6-10			
		11-12			0-3 4-12

Tamaño de las aberturas

1	Grandes: 40-80 % de la superficie de fachada
2	Medianas: 25-40 %
3	Pequeñas: 15-25 %
4	Muy pequeñas: 10-20 %
5	Medianas: 25-40 %

3-12					
1-2			0-5 6-12		
0	2-12				

Posición de las aberturas

6	En muros norte y sur: aberturas a barlovento (de donde proviene el aire) a la altura de las personas
7	Igual, pero con aberturas en las paredes interiores

					0-2
		2-12			

Protección de las aberturas

8	Evitar el soleamiento directo
9	Proveer de protección contra la lluvia

			0-2		
			3-12		

Pisos y muros

10	Ligeros con baja capacidad calorífica
11	Masivos, con más de 8 h. de desfase térmico

10-12			0-2		
			3-12		
			0-5		
0-9			6-12		

Cubiertas

12	Ligeras, con superficie reflectiva y cámara plena
13	Ligeras, con aislamiento térmico
14	Masivas, con más de 8 h. de desfase térmico

				1-12	
		1-12			

Características del espacio exterior

15	Espacio para dormir en el exterior
16	Drenaje pluvial suficiente

Fuente: Königsberger O., Ingersoll, Mayhew, & Szokolay (2013, pág. 285)

Coefficientes de forma y tratamiento de la piel de los edificios de Serra y Coch

Se trata de un conjunto de índices que relacionan diferentes atributos de los edificios, tanto de su forma general, como del tratamiento de fachadas, para con ellos hacer recomendaciones de diseño apropiado al clima. Fueron ideados por los arquitectos y catedráticos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Rafael Serra Florensa y Helena Coch Roura, a través de algunos medios didácticos que produjeron para sus cursos de posgrado. En 1991 reunieron los textos en una publicación dirigida no sólo a estudiantes, sino al gremio profesional más extenso, con el fin de aportar herramientas de toma de decisión para la realización de proyectos con alta eficiencia energética. El libro fue finalmente publicado en 1995 con el título de “Arquitectura y Energía Natural” por la propia UPC.⁶⁸

68. Ese libro (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 239-263) ha sido la fuente utilizada para la redacción de este apartado.

Para la construcción de los coeficientes, se consideraron esencialmente conceptos de tipo abstracto, y se trató de evitar la referencia a soluciones específicas muy detalladas, como la orientación o la situación concreta de los diferentes componentes o elementos del edificio, cuyo enorme número de posibilidades de composición habría hecho imposible su análisis. Así, los coeficientes se agrupan en tres grandes temas básicos del edificio: la forma general, las características de la piel y las de su diseño interior.⁶⁹

Para Serra y Coch (1995, pág. 240), la forma general del edificio puede definirse como el conjunto de sus características geométricas y volumétricas expresadas en tres atributos cuya definición matemática da lugar a los coeficientes respectivos. Estos son; compacidad, porosidad y esbeltez.

La compacidad de un edificio se define como la relación entre la superficie que rodea al edificio y su volumen. Es, por tanto, una medida de la concentración de las masas que lo componen. El coeficiente de compacidad c_0 (ecuación 4.1), se determina mediante la relación entre la superficie de una esfera (cuerpo con la máxima compacidad posible) que contiene un volumen igual que el del edificio en cuestión —denominada “superficie equivalente” S_e — y la superficie global del edificio S , que incluye tanto las fachadas y cubiertas libres, como las superficies en contacto con otros edificios y con el terreno (no se consideran para el cálculo patios menores a 1/16 de la superficie de sus fachadas y pliegues salientes de fachada menores a un metro). El coeficiente es adimensional y su valor máximo posible es uno, que indicaría que el edificio analizado es una esfera perfecta. Se expresa así:

69. Para los propósitos de este libro, sólo aludiremos a las dos primeras, mismas que están incluidas en la hoja de cálculo *bioclimarq*. Por la misma razón, se omiten en este apartado los efectos atribuibles a los diferentes coeficientes en materia de iluminación natural y control de ruido.

$$co = \frac{S_e}{S_G} = 4.836 \left(\frac{V_T^{(2/3)}}{S_G} \right) \quad \text{Ec.4.1}$$

Donde:

- co Coeficiente de compacidad (adimensional)
- S_e Superficie equivalente , en m^2
- V_T Volumen total del edificio incluidos patios, en m^3
- S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

En términos termodinámicos, a mayor compacidad menor es el contacto del edificio con las condiciones exteriores y por tanto menor la superficie susceptible al intercambio de energía, lo que significa menores posibilidades de captación de radiación, pero también de pérdida de calor hacia el exterior. En consecuencia, los edificios de alta compacidad pueden considerarse apropiados para regiones de climas extremos, muy cálidos, fríos o con demasiado viento (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 240-242).

La porosidad del edificio es considerada aquí en su dimensión horizontal, es decir corresponde a los “poros” o aberturas que presenta el edificio en planta. En términos arquitectónicos, estos “poros” no son otra cosa que los patios interiores. La porosidad, en consecuencia, es la proporción entre el volumen lleno —el volumen total del edificio— y el volumen vacío —el volumen que ocupan los patios—. En este caso, se consideran los patios menores a 1/16 de la superficie de sus fachadas, pues el resto ya fue considerado para la estimación de compacidad.

El coeficiente de porosidad po (ecuación 4.2), se define como la relación entre el volumen de los patios del edificio V_{ep} y el volumen total del edificio V_T . A su vez, V_{ep} se define como el volumen de una esfera de superficie igual a la suma de las superficies de todas las fachadas de los patios más la superficie de los patios (S). Su ecuación es:

$$po = \frac{V_{ep}}{V_T} = 0.094 \left(\frac{S_{PP}^{(3/2)}}{V_T} \right) \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

- po Coeficiente de porosidad (adimensional)
- V_{ep} Volumen de patios , en m^3
- V_T Volumen total del edificio incluidos patios, en m^3
- S_{PP} Superficie de las fachadas de los patios más la superficie de los patios, en m^2

La respuesta al clima de este atributo es similar a la de la compacidad, es decir, a mayor porosidad, más posibilidades de intercambio de calor y, por ende, más dificultades de aislamiento. En contraste, una porosidad alta ofrece mejores posibilidades de ventilación para las áreas interiores del edificio y da lugar a posibles espacios de transición con microclima propio. Esto amplía la posibilidad de aumentar la humedad del ambiente —sobre todo si en los patios hay vegetación o cuerpos de agua— lo que resulta de utilidad para climas cálidos secos, pero puede funcionar también para climas cálidos subhúmedos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 243-245).

Serra y Coch consideran a la esbeltez como un atributo importante para la caracterización de un edificio, la cual se determina por la relación de su altura con su huella en planta o área de ocupación, lo que determina su proporción en sentido vertical. Aunque incluyen el desarrollo de un coeficiente de esbeltez⁷⁰, plantean que deben evitarse edificios altos cualquiera que sea el clima (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 245-247), por lo que para efectos de *bioclimarq*, y por lo tanto de este libro, se decidió omitir este atributo ya que no genera indicaciones específicas para climas diferentes.

70. El coeficiente de esbeltez representa la relación entre la altura real del edificio y una altura equivalente determinada por el radio de un círculo cuya superficie es igual a la superficie media de ocupación en planta del edificio. (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 245-247)

Por su parte, la piel del edificio es considerada por Serra y Coch (1995, pág. 248) como el conjunto de paramentos que envuelven físicamente al edificio y separan el interior del exterior como una membrana que regula el intercambio de energía. La permeabilidad del edificio respecto a ese intercambio de energía estriba en la situación relativa del edificio con el terreno —asentado o elevado— y con otras edificaciones —adosado o exento—. Depende también de otros atributos propios de la forma, disposición y consistencia de los paramentos que forman la piel del edificio. A partir de estas consideraciones, los autores identifican diez atributos esenciales, pero plantean coeficientes para su análisis sólo de siete de ellos: asentamiento, adosamiento, pesadez, perforación, transparencia, aislamiento y tersura. Los tres restantes, textura, color y variabilidad, se enuncian sólo a nivel descriptivo.

El asentamiento es un atributo que indica el grado de contacto del edificio con el terreno. El coeficiente respectivo as (ecuación 4.3) se define, por lo tanto, como la relación entre la superficie asentada sobre el terreno S_{as} y la superficie global del edificio S_G , la cual se compone, además de la S_{as} , de las superficies adosadas a otros edificios S_{ad} y exentas, proyectadas o libremente expuestas al exterior S_{pr} . Su expresión matemática es:

$$as = \frac{S_{as}}{S_G} \text{ Ec. 4.3}$$

Donde:

- as Coeficiente de asentamiento (adimensional)
- S_{as} Superficie asentada sobre el terreno, en m^2
- S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

Los efectos relacionados con este coeficiente tienen que ver con la inercia térmica que propicia el terreno cuando entra en contacto con el edificio. Así, a mayor asentamiento, mayor la capacidad de amortiguamiento térmico del sistema, pero menor la posibilidad de captar radiación solar o ventilación, y por lo tanto,

posible aumento de humedad. Cuando el contacto con el terreno se da a profundidades mayores a seis metros, se establece una gran estabilidad térmica que origina una temperatura interior (T_i) prácticamente constante durante todo el tiempo —muy cercana a la temperatura promedio anual exterior (\overline{TS}_o)—. Esta es una situación muy conveniente para climas de tipo continental⁷¹ (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 248-250)

El adosamiento, por su parte, atañe al grado de contacto del edificio con otros edificios o construcciones vecinas. El coeficiente de adosamiento ad (ecuación 4.4), se define, por consiguiente, como la relación entre la superficie de las paredes entre medianeras o adosadas S_{ad} y la superficie global del edificio S_G —superficie ya definida en párrafos anteriores—. Su ecuación es:

$$ad = \frac{S_{ad}}{S_G} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

ad Coeficiente de adosamiento (adimensional)

S_{ad} Superficie adosada a otros edificios, en m^2

S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

El grado de adosamiento con que está resuelto un edificio, limita la disponibilidad de superficies capaces de intercambiar energía con el exterior. Así, un grado de adosamiento alto, reduce la posibilidad de captación solar y aumenta la dificultad de propiciar ventilación. Ello acarrea tanto un aumento de humedad relativa en el interior del edificio como un decremento en el potencial de iluminación y calefacción natural. A pesar de ello, un adosamiento alto protege en cierta medida de las inclemencias del clima, lo cual resulta especialmente conveniente en climas muy fríos y secos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 250-252).

El peso es una particularidad física de toda materia por efectos de su masa y la atracción gravitacional del planeta en que se

71. Se refiere a aquellos que presentan diferencias notables entre el verano y el in-

encuentra, pero aquí se incorporará una propiedad derivada del peso que se le llamará la *pesadez*. Se evaluará a partir de los componentes de la piel del edificio, definida por su composición constructiva. Así, el coeficiente de pesadez ps , (ecuación 4.5) expresa la relación entre la masa de la superficie total de la envolvente (M) y la superficie global del edificio. Su formulación matemática es:

$$ps = \frac{m}{S_G} \text{ Ec. 4.5}$$

Donde:

ps Coeficiente de pesadez, en kg/m^2

m Masa total de la envolvente del edificio. en kg

S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

Dado que el atributo de pesadez se basa en la consistencia de los materiales con que están contruidos los cerramientos, su efecto térmico está fuertemente asociado al concepto de inercia térmica. Así, a mayor pesadez de la envolvente, mayor amortiguamiento térmico en el interior, pero implica también aislamiento mayor, si cuando menos una capa del cerramiento está constituida por un material aislante. El manejo de este atributo es apropiado para climas continentales (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 252-253).

El concepto de perforación de un edificio es determinado por la magnitud y posición de los vanos, aberturas, perforaciones o poros en sentido vertical, esto es, en sus fachadas. Es un atributo que da idea de la permeabilidad del edificio respecto del paso del aire. Dado que los vanos de un edificio pueden ser dotados de dispositivos de cierre, su cuantificación es variable. Por ejemplo, los edificios suelen presentar un grado de perforación menor en invierno con respecto al del verano, a menos que se trate de un edificio con clima artificial y que para mantenerlo se cierra lo más posible. El coeficiente de perforación pr (ecuación 4.6) manifiesta vierno, y éste último suele ser muy frío. Se distribuyen mayormente en el hemisferio

la relación entre la superficie perforada S_{pr} , es decir la suma total de las superficies de los vanos abiertos y la superficie global de la piel S_G , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$pr = \frac{S_{pr}}{S_G} \text{ Ec. 4.6}$$

Donde:

- pr Coeficiente de perforación, adimensional
- S_{pr} Superficie total de perforaciones (vanos), en m^2
- S_G Superficie global del edificio, en m^2

Entre más perforada se encuentre la piel del edificio, las condiciones al interior tienden a igualarse a las que ocurren al exterior. Asimismo, una perforación alta asegura un alto número de renovaciones de aire, lo cual es sumamente conveniente para regiones de clima cálido húmedo. Una alta perforación es contraindicada, en cambio, para climas extremos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 254-255).

La transparencia es un concepto muy ligado al atributo de perforación, pues corresponde a la superficie de los vanos ocupada u obstruida mediante láminas de vidrio, cristal o similar. Si bien el edificio permite el paso de radiación solar tanto si es transparente —cuando deja pasar la luz— o no —cuando deja pasar parte de la radiación mediante procesos de absorción y reemisión—, pero la importancia de las superficies vidriadas radica en que retienen la radiación infrarroja, y no permiten que se disipe al exterior. Así, la transparencia determina en gran medida el comportamiento del edificio respecto de su capacidad de retener calor. El coeficiente de transparencia tr (ecuación 4.7) indica la relación entre la superficie vidriada del edificio S_v y la superficie global de la piel S_G . Se expresa así:

norte: norte de EUA y sur de Canadá en América; Europa Central y del Este; y en diversas regiones de China, Manchuria, Corea y Japón, en Asia.

$$tr = \frac{S_v}{S_G} \text{ Ec. 4.7}$$

Donde:

- tr Coeficiente de transparencia, adimensional
- S_v Superficie vidriada del edificio, en m^2
- S_G Superficie global del edificio, en m^2

La consecuencia térmica de este atributo está determinada por el efecto invernadero que ocurre cuando la radiación, después de atravesar la superficie vidriada, es absorbida por las superficies al interior, y es reemitida por éstas mediante ondas de longitud mayor que en gran parte no pueden volver a atravesar el vidrio. Como consecuencia un edificio con una superficie transparente muy extendida puede captar mucha energía radiante durante el día, o perderla durante la noche, si no se cuenta con sistemas que modifiquen la transparencia del vidrio —por ejemplo, mediante los llamados vidrios inteligentes⁷²—, o dispositivos móviles que obstaculicen la pérdida —cortinas, postigos o similares—. Así, un edificio altamente transparente puede generar oscilaciones térmicas muy fuertes al interior, por lo que no es recomendable para ningún tipo de clima, y debe ser contemplado con prudencia (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 256-257).

El aislamiento térmico es una condición que caracteriza a un edificio en función del tipo de material que conforma sus superficies exteriores. Si éste es altamente poroso, el aire encapsulado constituye una barrera al flujo de calor, que se presenta cada vez que existe una diferencia entre la temperatura exterior y la interior. El coeficiente de aislamiento \bar{U} (ecuación 4.8), por su parte, se determina mediante la magnitud global de las pérdidas térmi-

72. El vidrio inteligente es un tipo de vidrio capaz de cambiar sus propiedades de transmisión de luz si se le aplica una corriente eléctrica. Las tecnologías más empleadas incluyen dispositivos electro-cromáticos, de partículas suspendidas, micro persianas y a base de cristal líquido LCD (Vidrio inteligente, 2019).

cas que potencialmente pueden darse en un edificio. Se trata de la transmitancia térmica media \bar{U} del edificio, que se determina dividiendo el coeficiente de transmitancia UA del edificio y la superficie global de la piel S_G . El coeficiente UA del edificio —tal como se explicó en el apartado 4.1.4. de este capítulo, resulta del producto de la suma de las transmitancias U_i de cada elemento por su área correspondiente S_i (ecuación 4.9). La expresión matemática del coeficiente de aislamiento \bar{U} , es:⁷³

$$\bar{U} = \frac{UA}{S_G} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde:

\bar{U} Coeficiente de aislamiento o transmitancia térmica media del edificio ($W/m^2 K$)

UA Coeficiente de transmitancia térmica del edificio, en W/K

S_G Superficie global del edificio, en m^2

y:

$$UA = \sum_i S_i U_i \quad \text{Ec. 4.9}$$

donde:

S_i Superficie de cada uno de los cerramientos del edificio, en m^2

U_i Coeficiente de transmitancia de cada cerramiento, en $W/m^2 K$

Cuando un edificio tiene un alto grado de aislamiento térmico, el intercambio de energía entre el interior y el exterior se reduce sensiblemente, lo que en periodos fríos resulta muy conveniente puesto que evita la pérdida de calor. Sin embargo, la eficacia del

73. La ecuación publicada en Serra & Coch (1995, pág. 258) incluye un coeficiente de situación del cerramiento, pero no aclara en que consiste, por eso se ha omitido. En todo caso, el resultado que arroja la ecuación presentada aquí es un buen indicador de su desempeño térmico.

aislamiento depende de la orientación en que se ubica, por lo que se recomienda colocarlo en donde las condiciones externas sean las más críticas. En consecuencia, el aislamiento se puede considerar una medida muy apropiada tanto para climas fríos, como para climas cálidos secos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 257-258).

La tersura de la piel de un edificio es un atributo determinado por la existencia de salientes y/o entrantes en la fachada, a manera de pliegues, cavidades o relieves, cuya proyección, con respecto del paño de fachada, no sea superior a un metro. Cuando esa distancia supera el metro forma parte de las consideraciones del atributo de compacidad, revisado párrafos atrás. Ahora bien, el coeficiente de tersura ts , (ecuación 4.10) se define como la relación entre la superficie del área proyectada de los pliegues S_{py} y la superficie global de la piel S_G . Se determina con la siguiente ecuación:

$$ts = \frac{S_{py}}{S_{de}} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

ts Coeficiente de tersura (adimensional)

S_{py} Superficie proyectada o sobresaliente de la fachada, en m^2

S_{de} Superficie desarrollada en fachadas, en m^2

El efecto de la tersura consiste en que a mayor relieve de las fachadas es mayor el área de contacto con el exterior. También un relieve alto acarrea una mayor generación de sombras sobre la superficie de fachada, lo que resulta conveniente para veranos cálidos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 259-260).

El concepto de la textura de la piel de un edificio se refiere al tipo de acabado superficial a pequeña escala. Los grados de textura se establecen a partir de la medida de la rugosidad, en mm. La “repercusión climática” en realidad es poco apreciable, inde-

pendientemente de que sea mucha o poca la rugosidad en la piel exterior del edificio. Sin embargo, una piel muy rugosa favorece, así sea de forma poco importante, el intercambio por convección superficie-aire.

El color es una particularidad muy importante de la piel de los edificios, por sus repercusiones en el desempeño radiante de sus superficies exteriores. Si bien los autores no incluyen expresamente un coeficiente asociado a este atributo, queda claro, a partir de la lectura de su descripción (Serra Florensa & Coch Roura, 1995, págs. 261-262), que el coeficiente que le corresponde es el factor de absorptividad a (adimensional), explicado en el apartado 4.4. de este capítulo (págs. 27-30). Los valores de absorptividad de diferentes colores y terminados de superficie, han sido también presentados ya en la tabla 4.2 y en la figura 4.4. de este capítulo. Se podría concluir, con respecto a este atributo, que, a mayor coeficiente de absorptividad a (colores cada vez más oscuros), mayor captación de energía radiante, lo cual puede ser favorable para climas fríos. Lo opuesto, un coeficiente a tendiente a cero (colores cada vez más claros), resulta conveniente para climas cálidos.

La variabilidad de la piel de un edificio es un atributo que depende de la posibilidad que tienen sus componentes de cambiar sus características. Este cambio puede conceptualizarse de dos maneras: como modificación o como practicabilidad. La modificación se refiere a cambios en la consistencia de los elementos de la piel, tales como la posibilidad de transformar la transparencia u opacidad de las superficies con la consiguiente alteración de la relación vacío-lleño, o bien, la posibilidad de convertir elementos conductores en aislantes, lo que altera la viabilidad del intercambio de energía interior-exterior —por ejemplo, mediante el uso de vidrio inteligente o la aplicación de pigmentos termo-crómicos—. La practicabilidad, por su parte, atañe a cambios en la posición o ubicación de los elementos de la piel, como, por ejemplo,

la posibilidad de mover, voltear o eliminar cerramientos según lo requiera la necesidad de adaptación térmica. De aplicarse esta variabilidad —en cualquiera de sus dos opciones— alteraría estacionalmente la cantidad de radiación que penetra al interior del edificio, así como las condiciones de ventilación, lo cual puede ser favorable en climas con temporadas claramente diferenciadas, como sucede en las regiones de clima templado así como de clima árido.

4.1.6. A manera de conclusión

Si bien puede parecer arduo y complejo el proceso de elaborar proyectos arquitectónicos siguiendo el método propio de la bioclimática, las herramientas de análisis, diagnóstico y recomendaciones de diseño presentadas en este capítulo —e incorporadas a la hoja de cálculo *bioclimarq*— facilitan en gran medida la toma de decisiones, en especial para aquellos profesionales que se inician en la disciplina. La experiencia acumulada y la retroalimentación que aporta la aplicación de estas herramientas y método en diferentes proyectos dará a los profesionales de la arquitectura y diseño, la pericia que exige la creciente demanda de expertos especializados en el desarrollo sostenible del hábitat, cuando menos en el ámbito del uso eficiente de energía, el confort térmico de los habitantes y la adaptación al clima de los edificios y espacios abiertos.

4.2 Clima urbano

La expresión más amplia del hábitat adaptado es la urbanización. La relación entre urbanismo y clima se da en dos sentidos: las ciudades modifican el clima y el clima debería guiar en parte el desarrollo urbano, aunque en la realidad prácticamente no se le toma en cuenta para la planeación del desarrollo ciudadano. Esta sección se ocupará de la relación sólo en el primer sentido, y empezará por enumerar cuatro libros básicos de climatología urbana, uno de ellos sobre la Ciudad de México.

El químico Luke Howard (1772–1864) entre 1818 y 1820 publicó en dos tomos *The climate of London*, primera obra impresa dedicada a la climatología urbana, a la que siguió una reedición en tres tomos en 1833. Trata fundamentalmente de la estructura y evolución de los campos de temperatura en Londres y sus alrededores; la *International Association for Urban Climate* en 2002 reimprimió la obra completa en un solo tomo.

Siglo y medio después Helmut Landsberg (1981) publicó un resumen del conocimiento acumulado hasta entonces en *The urban climate*, obra que además de aportar valiosos datos, hizo conscientes a sus lectores de un principio simple pero fundamental: el clima urbano es el resultado del clima global, modificado por las condiciones locales, a su vez alteradas por la urbanización. Poco después Timothy Oke (1987) publicó *Boundary layer climates*, que hace énfasis en el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, y por tanto dedica un capítulo a ese intercambio en las ciudades. Posteriormente apareció *Urban climates* (Oke et al., 2017), primera sistematización moderna de conceptos, métodos y resultados de la climatología urbana en momentos en que la preocupación central es el cambio climático global.

En nuestro país, desde mediados hasta finales del siglo XX Ernesto Jáuregui publicó decenas de artículos sobre el tema que sintetizó en *El clima de la ciudad de México* (Jáuregui, 2000).

Esta sección en lo fundamental se basará en las obras mencionadas, más unas cuantas que se citarán adelante.

Regresemos a la idea difundida por el libro de Landsberg (1981) en el sentido de que el clima de una ciudad (*C*) es el resultado de los patrones meteorológicos de gran escala (*G*), modificados por las características de la geografía física local (*GL*) más lo inducido por la propia urbanización (*UR*), que conceptualmente quedaría como:

$$C = G + GL + UR$$

Ec. 4.11

De esas interacciones resultan cambios en los patrones térmicos –las llamadas islas urbanas de calor (IUC)– y de humedad atmosférica; en algunos casos se han observado incrementos en la precipitación pluvial, variaciones complicadas en los intercambios de energía entre las superficies construidas, fuertes perturbaciones de los patrones de viento y deterioro en la calidad del aire.

El efecto urbano sobre el clima más conocido es la configuración de las líneas de igual temperatura (isotermas) en forma de isla o islas, que suelen aparecer en:

- la superficie urbana, por efectos de una mayor absorptividad de la radiación solar (a cociente de la radiación incidente entre la absorbida) por parte de los espacios construidos respecto de las zonas suburbanas o rurales menos densamente edificadas, o
- la atmósfera a nivel de la altura de los humanos, dentro del dosel urbano, o
- la atmósfera por encima del dosel urbano, en la llamada capa límite urbana, o
- por debajo de la superficie.

La primera es un tipo de isla superficial, no atmosférica, como la que se muestra en la figura 4.8. Ejemplos de las islas de calor atmosféricas se presentan en la figura 4.9, obtenida a partir de mediciones a dos metros de altura a orilla de calle, y en la figura 4.10 -patrón clásico de la isla por encima del dosel urbano- fue construida a partir de mediciones con termómetros meteorológicos sobre techos o azoteas.

Estas islas no son permanentes, sino que están en función de condiciones espaciales y temporales. La isla superficial es propia de días secos y soleados, depende de las características térmicas de los materiales de construcción y de su albedo (δ fracción de

radiación solar que refleja una superficie en comparación con la que recibe); se atenúan con la precipitación pluvial –lluvia, nieve o granizo–. La segunda y la tercera están sujetas a que el viento sea débil o esté en calma, y se observan más intensamente en las madrugadas, cuando es máxima la emisión de calor desde la superficie hacia la atmósfera. No siempre adquieren la misma configuración, y con vientos intensos se desvanecen.

La subsuperficial depende de las emisiones de calor de los ductos e instalaciones urbanas subterráneas.

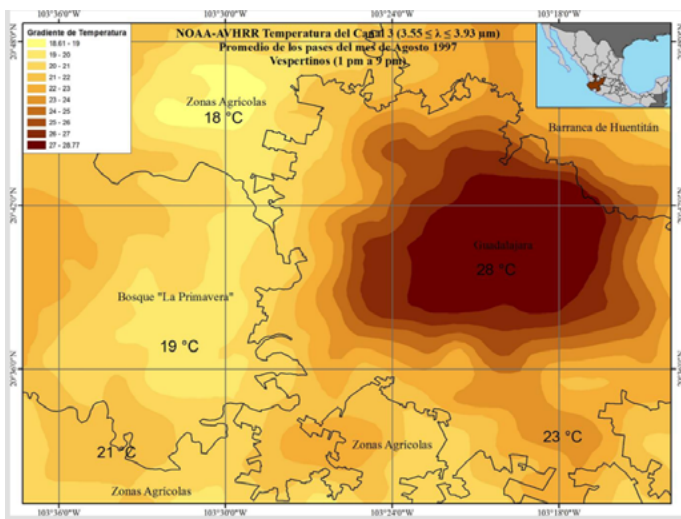


Figura 4.8 Isla urbana de calor nocturna promedio en la ciudad de Guadalajara, México, en agosto de 1997 (cerca de tres millones de habitantes a esa fecha),⁷⁴ mediante imágenes NOAA-AVHRR. Fuente: Galindo-Estrada (2010).

Las islas atmosféricas se presentan incluso en poblados de mil habitantes, y su intensidad máxima (IC_{max} en K) está relacionada con las características urbanas, como lo muestra la figura 4.11. Para ciudades latinoamericanas, incluidas en la categoría de “otros

74. https://www.lahn.utexas.org/wp-content/uploads/2020/05/Guadalajara-Metro-Area_Introduction.pdf

países” en la figura 4.11, se obtiene que esa intensidad máxima puede relacionarse con el logaritmo en base 10 (\log_{10}) de la población (P_c número de habitantes de la ciudad), como en la ecuación 4.12, según (Tejeda-Martínez & Jáuregui-Ostos, 2004) a partir de (Jáuregui, 1986):

$$IC_{max} = 2\log_{10}P_c - 8 \quad \text{Ec. 4.12}$$

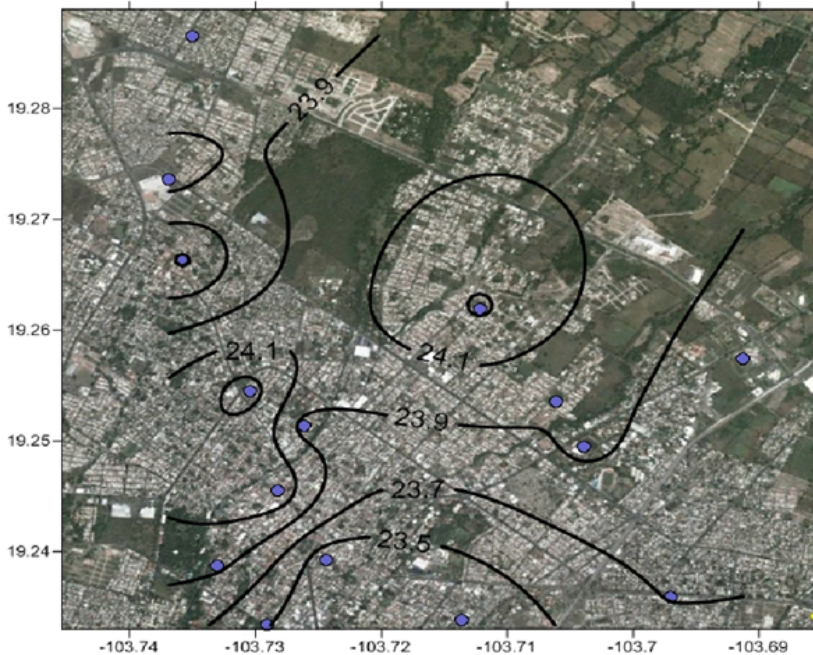


Figura 4.9 Isla urbana de calor detectada en la ciudad de Colima, México, el 8 de mayo de 2013. A las 10 pm hora local (aproximadamente 250 mil habitantes en esa fecha), mediante mediciones de temperatura atmosférica a orilla de calle realizadas con vehículo móvil.

Fuente: Valladares Anguiano (2022) (comunicación personal).

Desde luego, el tamaño de la población es sólo un indicador indirecto, pues el fenómeno es más complejo; dos urbes con poblaciones similares pueden tener ambientes físicos muy diferentes

que hacen que sus islas de calor tengan intensidades dispares. No obstante, si se conoce la intensidad máxima de la isla en alguna ciudad, proyecciones demográficas a futuro pueden ayudar a estimar en qué medida se incrementará el calentamiento por urbanización y, por ejemplo, proyectar modificaciones en los consumos de energía para la climatización de edificios o sus requerimientos bioclimáticos, pero recuérdese que no se puede generalizar para todo un asentamiento urbano, pues la intensidad de la isla de calor disminuye hacia la periferia, aunque se puede estimar que la intensidad media (IC_{media}) es aproximadamente la intensidad máxima dividida entre 4 (Ec. 4.13):

Nótese también que de la figura 4.11 y la ecuación 4.12 se obtienen valores máximos, es decir, las diferencias térmicas más altas encontradas entre el centro de la isla y los alrededores de la ciudad en un momento dado, no de manera permanente. Por esta razón no es fácil comparar este calentamiento con el que ocurre a escala global inducido por los gases de efecto invernadero, que de mediados del siglo XVIII al presente han incrementado la temperatura promedio del planeta en 1 K (ver la siguiente sección, así como la introducción y el capítulo 2 de este libro), o 0.8 K en el último siglo. La figura 4.12 representa la tendencia de la temperatura promedio anual del observatorio de Tacubaya, al poniente de la Ciudad de México. De 1920 a 2014 hay un incremento aproximado de 1.2 K, es decir, como 0.43 K por encima que el calentamiento promedio planetario reportado por el Panel Intergubernamental ante el Cambio Climático (Arias et al, 2021), diferencia que muy probablemente se pueda atribuir al calentamiento urbano.

Nótese que este calentamiento detectado en casi un siglo es menor al que induce la urbanización, pero de manera momentánea, no permanente, como en el ejemplo de la figura 4.12.

Toluca, La Comarca Lagunera, Tijuana, Veracruz, Mérida y algunas más. Como se podrá comprender, no todas las islas de calor tienen el mismo impacto, pues en algunas incrementan la sensación de incomodidad por temperaturas altas y consecuentemente los riesgos para la salud en personas con padecimientos cardíacos, la proliferación de vectores del paludismo, o el aumento del consumo de energía para climatización de edificios con la consecuente retroalimentación de mayor calor de desecho arrojado al ambiente; pero en los sitios templados o fríos no representan necesariamente un riesgo al bienestar o a la salud pues, al contrario, disminuyen la sensación de incomodidad por temperaturas bajas.

$$IC_{med} = \frac{IC_{max}}{4} \quad \text{Ec. 4.13}$$

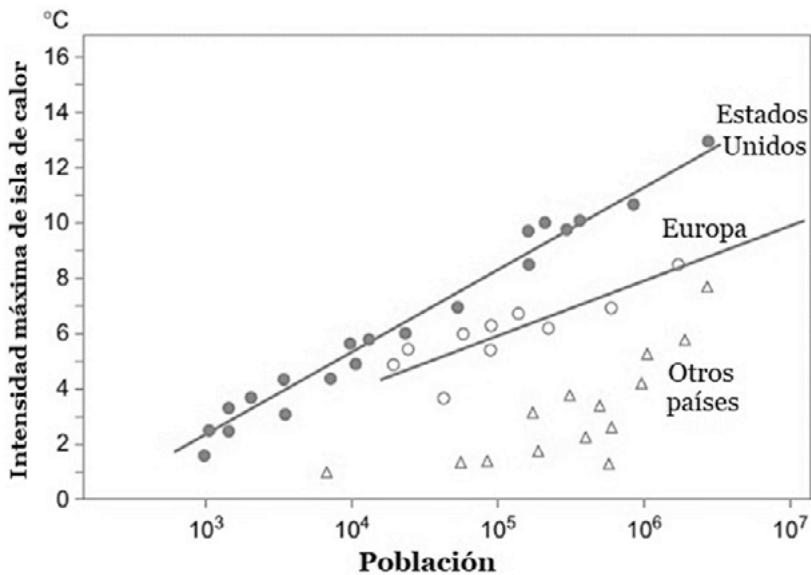


Figura 4.11 Intensidad máximas de la isla urbana de calor. Mediciones realizadas en distintas ciudades de Estados Unidos, Europa y otras regiones. Elaborado con base en Jáuregui (1986) y Oke et al. (2017).

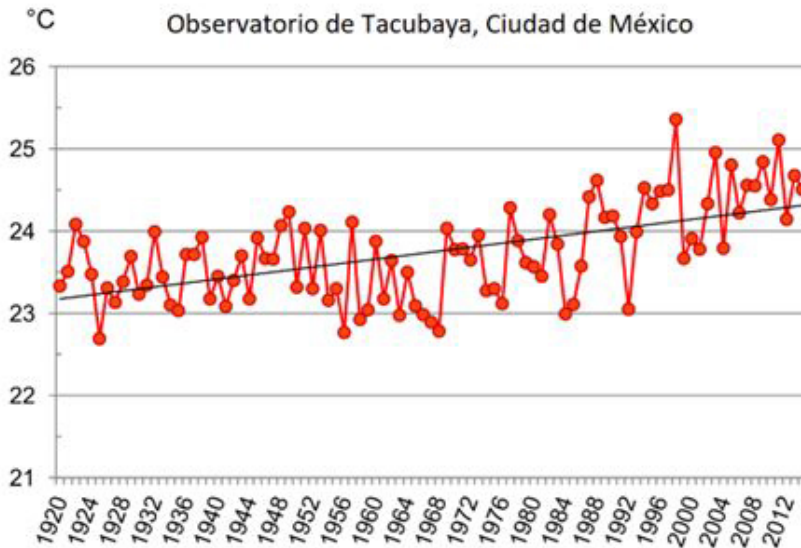


Figura 4.12. Temperatura máxima promedio anual en el Observatorio de Tacubaya, Ciudad de México. Fuente Luyando-López (2016).

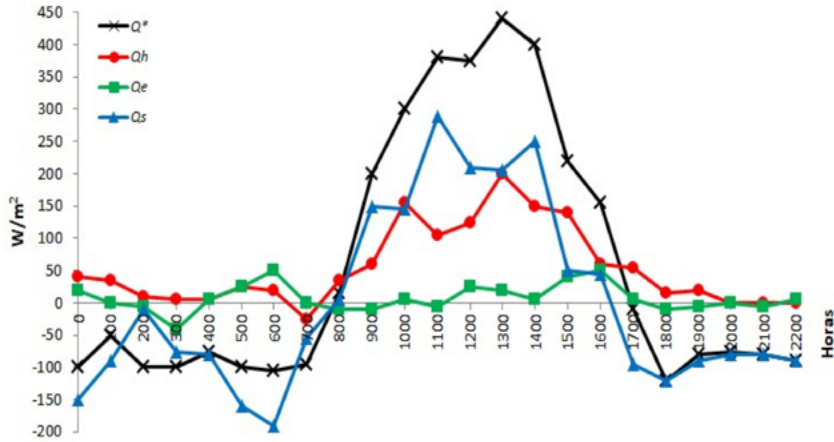
Fundamentalmente las islas urbanas de calor se originan por los cambios en la cubierta del suelo, que al dejar de tener vegetación o cuerpos de agua, consume parte de la energía solar recibida en calentar el aire y la superficie en vez de gastarlo en evaporar agua. La radiación neta es la energía que se queda atrapada en la interfaz superficie/atmósfera una vez que parte de la radiación solar es reflejada y otra emitida hacia la atmósfera. Esa radiación neta (que abreviaremos Q^*) se gasta principalmente en evaporar agua (calor latente de evaporación, Q_e), en calentar el aire (calor sensible turbulento, Q_h) y una porción que queda almacenada en la superficie (Q_s), como en la aproximación siguiente:

$$Q^* = Q_e + Q_h + Q_s \quad \text{Ec. 4.14}$$

En la figura 4.13 se nota que en el centro de la Ciudad de México (Palacio de Minería) Q_e es casi cero, mientras que durante el día la Q^* se reparte entre lo almacenado en las superficies (Q_s),

en muchos casos de concreto, y el calentamiento del aire (Q_h). En el Plan Texcoco, al poniente, en agosto, con un suelo cubierto de pastizal húmedo, Q_e es muy alta y Q_b y Q_s casi cero.

a) Palacio de Minería



b) Plan Texcoco

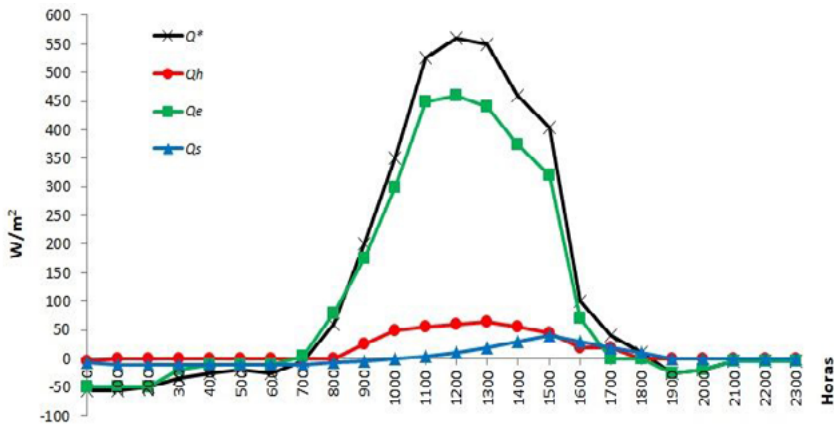


Figura 4.13. Balance de energía en la interfaz superficie/atmósfera En el centro de la Ciudad de México (Palacio de Minería, 3 de diciembre de 1993) y en una zona rural (Plan Texcoco, agosto 29 de 1994).

Adaptada de Tejeda-Martínez y Jáuregui-Ostos (2005).

La sensación de confort, como se explicó en el capítulo 3, depende, entre otras variables, de la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar recibida, las dos últimas en buena medida controlables al interior de las edificaciones.

En cuanto a la humedad, es claro que aun manteniendo sin cambios la concentración de vapor, por el incremento de temperatura que significa la isla de calor habría una disminución de la humedad relativa, pero no necesariamente ese cambio se refleja en una modificación sustancial de la razón de mezcla, la humedad específica o la absoluta (sobre estos conceptos ver el capítulo 2). La figura 4.14 muestra isohigras para la Ciudad de México y áreas aledañas, con diferencias en humedad específica (gramos de vapor/kg de aire) entre varios puntos de la ciudad, que están en el orden de la incertidumbre de los instrumentos de medición, por lo que no se pueden tomar como resultados concluyentes (Jáuregui y Tejeda, 1997).

Contrario a la detección de las modificaciones térmicas por la urbanización, las higras y las pluviométricas han sido menos estudiadas, son menos frecuentes y menos notorias. Para el observatorio meteorológico de Tacubaya, al poniente de la Ciudad de México, Luyando-López (2016) encontró un incremento en la precipitación pluvial anual de aproximadamente 200 mm (litros/m²) en cien años (figura 4.15), que es aproximadamente el 30% del promedio 1920-2014, aunque no se sabe a ciencia cierta si se debe a la urbanización, a cambios en los patrones de circulación atmosférica de mayor escala o a efectos de las partículas contaminantes en la microfísica de nubes.

La misma autora encontró que los vientos en el centro de la Ciudad de México (Palacio de Minería) en promedio son más intensos que en el Plan Texcoco, planicie ubicada al oriente de la ciudad (figura 4.16). Desde luego, tampoco esta diferencia es totalmente atribuible a la urbe.

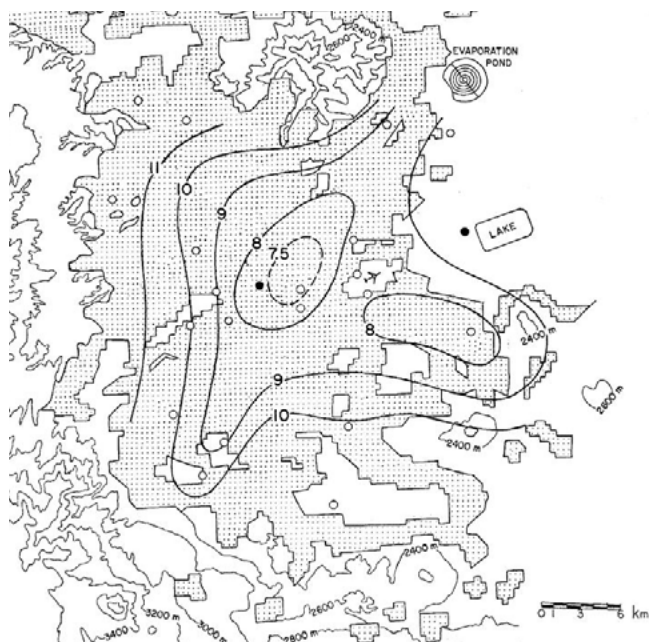


Figura 4.14. Distribución promedio de la humedad específica (g/kg) en la Ciudad de México. Julio de 1990 a las 2 pm hora local. Adaptada de Jáuregui y Tejeda (1997).

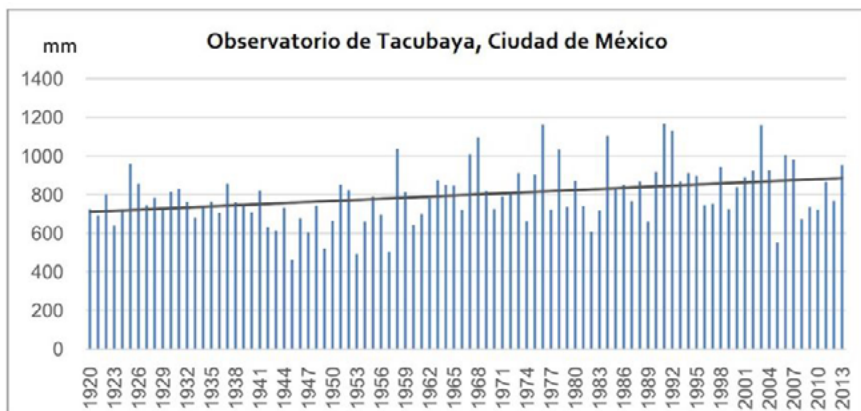


Figura 4.15. Tendencia de la precipitación pluvial en el occidente de la Ciudad de México. De 1920 a 2013. Fuente: Luyando-López, (2016).

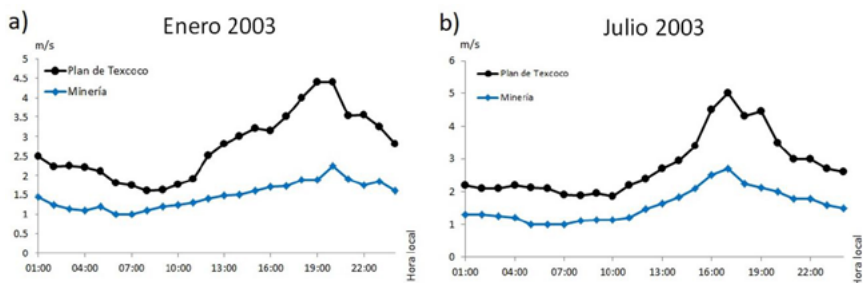


Figura 4.16. Promedio mensual de la rapidez del viento en meses representativos. Temporada seca (enero) y lluviosa (julio) en el centro de la ciudad de México (Palacio de Minería) y en la zona rural al oriente (Plan de Texcoco). Fuente: Luyando-López (2016).

La radiación solar también sufre alteraciones en las ciudades, principalmente debido a la contaminación atmosférica. Jáuregui y Luyando (1999) encontraron que en el centro de la Ciudad de México (Palacio de Minería) o en la zona poniente (Tacubaya) se pueden presentar disminuciones en la radiación solar global de alrededor de un 20% respecto a la periferia rural (Plan Texcoco), como se ve en la figura 4.17, que promedia días despejados de 1995 y 1996.

Debe recalcar que lo mostrado en esta sección son ejemplos de comportamientos típicos de la temperatura, la precipitación, la humedad, el viento y la radiación solar en las ciudades, pero no responden a reglas de validez general.

4.3 Efectos del cambio climático

Tanto en la introducción como en la sección 2.2 de este libro se describió de manera general el fenómeno del cambio climático global, inducido por actividades humanas desde la Revolución Industrial, cuando inició la inyección intensiva de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Como consecuencia, el calentamiento del planeta en los 50 años recientes es inequívoco según el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio

Climático (IPCC, 2013) y el sexto informe del mismo organismo (Arias et al, 2021). Además, se prevé que la temperatura continúe incrementándose y podría alcanzar un umbral decisivo de 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales para el año 2030 (IPCC, 2018), lo que aceleraría aún más los efectos de este fenómeno mundial.

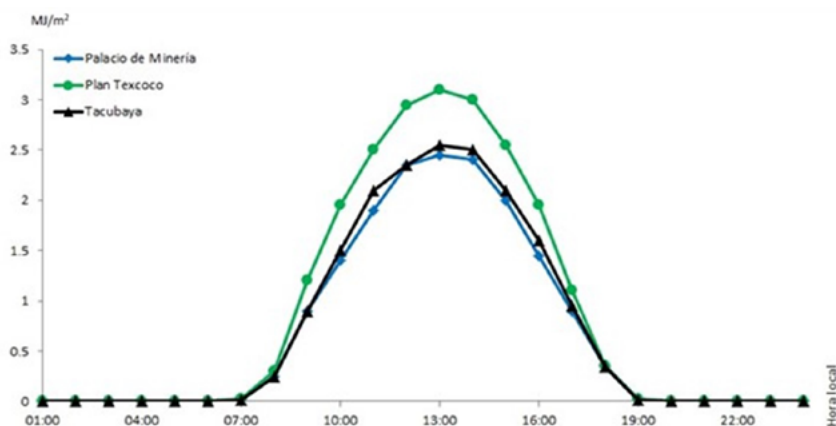


Figura 4.17. Radiación solar global media en días despejados. 1995 y 1996.
Fuente: Jáuregui y Luyando (1999).

Para enfrentar el fenómeno, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático plantea dos tipos de acciones: la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, que conlleva la disminución de esas emisiones o su captura, por ejemplo, por la vegetación arbórea, y la adaptación al fenómeno (IPCC, 2022 a.). Las edificaciones juegan un papel importante en ambas: por un lado, deben disminuir sus emisiones y hacer un uso eficiente de la energía (IPCC, 2018), como por ejemplo abatiendo el uso de sistemas activos de climatización que consumen combustibles fósiles, y por el otro deben estar preparadas para enfrentar el cambio climático, particularmente el calentamiento planetario y el urbano, este último descrito en la sección anterior.

Esta sección se ocupará de los posibles efectos térmicos del cambio climático. Primero se deben considerar las concentraciones –naturales y antropogénicas– de gases de efecto invernadero y de otros forzantes en la atmósfera a los que responde el clima; para ello se utilizan modelos de circulación general de la atmósfera que incluyen información sobre el comportamiento de la atmósfera y se alimentan de los escenarios de emisiones en el futuro.

De acuerdo con el IPCC (2001) “...un escenario es una descripción coherente y plausible de un estado futuro del mundo...”. Es importante recalcar que dichos escenarios no son pronósticos sino posibilidades o proyecciones de lo que podría suceder bajo diferentes hipótesis.

Desde el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2013) se introdujeron escenarios basados en rutas de emisión, concentración y uso del suelo, así como proyecciones socio económicas: las denominadas *trayectorias representativas de concentración* (RCP, *Representative Concentration Pathways* por sus siglas en inglés). Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, cuya cifra numérica indica la cantidad de radiación adicional (en W/m^2), que ganaría el sistema climático durante el presente siglo (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración

Escenario	Forzamiento radiativo (en W/m^2)	Concentración de CO_2 equivalente (en ppm)	Horizonte al 2100
RCP 8.5	>8.5	>1,370	peligro extremo
RCP 6.0	6	850	estable
RCP 4.5	4.5	650	estable
RCP 2.6	Pico en 3	Pico en 490	en descenso

Adaptado de Moss et al. (2010).

El IPCC (2018) plantea que es riesgoso para el clima planetario, y con él para los ecosistemas, las economías y las sociedades,

que en el resto del siglo aumente la temperatura media global en más de 1.5 K respecto del promedio de mediados del siglo XVIII, al inicio de la Revolución Industrial. No obstante, para efectos de planeación a mediano y largo plazos conviene usar el escenario menos optimista, el RCP 8.5 —*business as usual*—, el cual considera que las emisiones continuarán aumentando durante el resto del siglo al ritmo que lo vienen haciendo. Implica que en el horizonte cercano, antes de 2040, se calentará el planeta 1 K respecto a la era preindustrial, 1.5 K hacia mediados del siglo (2040-2074) y 2 K a finales (2075-2099). Las respectivas proyecciones para México usadas para la elaboración de la Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (SEMARNAT-INECC, 2018) fueron generadas por la consultoría INECC-PNUD (2017a). Por ejemplo, en la figura 4.18 se muestran las temperatura máximas y mínimas promedio 1980-2009 y sus proyecciones a corto, mediano y largo plazos para las zonas metropolitanas que en 2010 tenían más de 500,00 habitantes (tabla 4.10)⁷⁵.

Para generar escenarios futuros de bioclima y aplicarlos a *bi-climarq* sería de mucha utilidad que los usuarios tuvieran información de este tipo, que seleccionaran la RCP que consideraran adecuada, y procedieran a realizar los cálculos. La información para la región de cada usuario es probable que se encuentre en las páginas oficiales sobre cambio climático de su país o zona, y la RCP a seleccionar depende de qué tan optimistas sean los usuarios respecto del futuro del clima; se puede partir de una RCP de 2.0, incluso, pero no sería muy realista.

No es sencillo obtener escenarios de humedad atmosférica, pero una hipótesis útil es considerar que la humedad relativa permanecerá invariante, puesto que al aumentar la temperatura del

75. En el AR6 en vez de hacer referencias a las RCP (*representative concentrations pathways*), se utilizan las SSP (*shared socioeconomic pathways*), pero dado que las RCP están más difundidas, se mantendrá su uso en este capítulo.

planeta aumentará la presión de vapor de saturación, pero también la evaporación del agua contenida en las superficies de modo que la presión de vapor (no la de saturación, sino la *real*) aumentará de manera que aproximadamente la humedad relativa no cambie (para recordar estos conceptos véase la sección 2.3 de este libro).

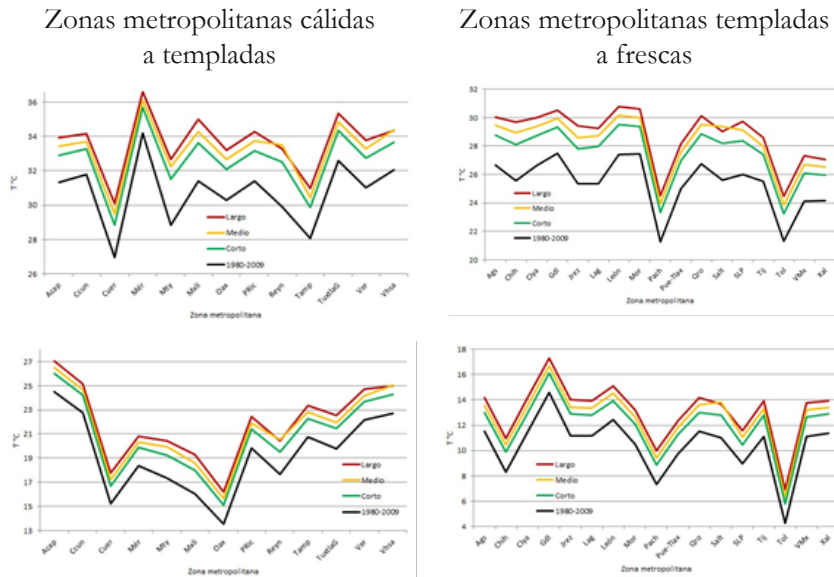


Figura 4.18. Temperaturas máximas medias anuales (arriba) y mínimas medias anuales (abajo) 1981-2009. Incrementos esperados con una RCP 8.5 para los plazos corto (1 K de incremento térmico promedio mundial respecto a la era preindustrial, antes de 2040), mediano (1.5 K, entre 2040 y 2074) y largo (2 K entre 2075 y 2099), en zonas metropolitanas cálidas a templadas (izquierda) y en templadas a frescas (derecha). Fuente: INECC-PNUD (2017a) y Tejeda-Martínez et al, (2021).

Una vez conocidos los posibles incrementos y utilizando el índice Humidex (ver la sección 3.3.1), se estimaron para la Sexta Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), los posibles escenarios de las condiciones de confort térmico, en función de las horas-grado que requieren enfriamiento (horas-grado-frío) o ca-

lefacción (horas-grado-calor). Así, se espera que las zonas metropolitanas que incrementarían más sus consumos energéticos para enfriamiento en México (SEMARNAT-NECC, 2018; INECC-PNUD, 2017b; Tejeda-Martínez et al, 2021), se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.10. Población en las Zonas Metropolitanas con más de 500 mil habitantes en 2010. Entre paréntesis las abreviaturas usadas en la figura 4.18.

Zona Metropolitana	Población 2010 (INEGI) (en miles de habitantes)	Zona Metropolitana	Población 2010 (INEGI) (en miles de habitantes)
Valle de México (Vmex)	20,117	Acapulco (Acap)	863
Guadalajara (Gdl)	4,435	Tampico (Tamp)	859
Monterrey (Mty)	4,106	Chihuahua (Chih)	853
Puebla-Tlaxcala (Pue-Tlax)	2,729	Morelia (Mor)	830
Toluca (Tol)	1,936	Saltillo (Salt)	823
Tijuana (Tij)	1,751	Veracruz (Ver)	812
León (León)	1,610	Villahermosa (Vhsa)	755
Ciudad Juárez (Jrez)	1,332	Reynosa-Río Bravo (Reyn)	727
La Laguna (Lag)	1,216	Tuxtla Gutiérrez (TuxtlaG)	684
Querétaro (Qro)	1,097	Cancún (Cun)	677
San Luis Potosí (SLP)	1,040	Xalapa (Xal)	667
Mérida (Mér)	973	Oaxaca (Oax)	608
Mexicali (Mxli)	937	Celaya (clya)	602
Aguascalientes (Ags)	932	Poza Rica (PRic)	514
Cuernavaca (Cuer)	925	Pachuca (Pach)	512

Fuente: INECC-PNUD, 2017b; Tejeda-Martínez et al, 2021

Tabla 4.11. Zonas metropolitanas mexicanas de más de 500 mil habitantes que incrementarán sus necesidades de enfriamiento. Incrementos en más de 100 GW-h (intervalos esperados redondeados a decenas) para cuando la Tierra alcance un calentamiento de 2 °C respecto al periodo preindustrial.

Zona metropolitana	Población 2010 (INEGI) en miles de habitantes	Incremento por habitante en kWh	Incremento por zona metropolitana en GW-h
Monterrey	4,106	180	1060
Mexicali	937	610	950
Reynosa-Río Bravo	727	500	560
Cancún	677	200	310
Mérida	973	150	210
Villahermosa	755	200	210
Veracruz	812	200	200
Tampico	859	170	200
Ciudad Juárez	1,332	105	200
La Laguna	1,216	<100	110

Fuente: INECC-PNUD (2017b) y Tejeda-Martínez et al, (2021)

Estos valores son un motivo de peso para optar por sistemas de climatización pasiva o activa limpia en las edificaciones, desde ahora.

Referencias

- Abbott, M., & Van Ness, H. (1976). *Teoría y problemas de Termodinámica*. México: Libros McGraw Hill.
- AH Dictionary. (2020 a.). *Thermal conductivity*. (H. M. Company, Ed.) Obtenido de The American Heritage® Dictionary of the English Language: <https://www.ahdictionary.com/word/search.html?q=thermal+conductivity>
- AH Dictionary. (2020 b.). *Heat capacity*. Obtenido de The American Heritage® Dictionary of the English Language: <https://www.ahdictionary.com/word/search.html?q=heat+capacity>
- AH Dictionary. (2020 c.). *Specific heat*. Obtenido de The American Heritage® Dictionary of the English Language: <https://www.ahdictionary.com/word/search.html?q=specific+heat>

- Alter, L. (11 de October de 2018). *The Trombe Wall: Low Tech Solar Design Makes a Comeback*. Obtenido de Treehugger. Sustainability for All: <https://www.treehugger.com/the-trombe-wall-low-tech-solar-design-makes-a-comeback-4856838>
- ANSI/ASHRAE. (2017). *ASHRAE:55 Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Arias, P. A., N. Bellouin, E. Coppola, R. G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M. D. Palmer, G-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P. W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R. P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J. G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W. D. Collins, S. L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F. J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F. J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J. S. Fuglestedt, J. C. Fyfe, N. P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J. M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H. T. Hewitt, P. Hope, A. S. Islam, C. Jones, D. S. Kaufman, R. E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T. K. Maycock, M. Meinshausen, S-K. Min, P. M. S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A. C. Ruane, L. Ruiz, J-B. Sallée, B. H. Samset, S. Sathyendranath, S. I. Seneviratne, A. A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A-M. Treguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zachle, X. Zhang, K. Zickfeld, 2021, Technical Summary. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy,

- J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Aronin, J. (1951). *Climate and architecture : with special reference to Montreal and surroundings*. Montreal, Québec, Canada: McGill University. Obtenido de <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/p5547v88m>
- Aronin, J. (1953). *Climate and architecture*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(347), 135-136.
- ASHRAE. (2021). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Peachtree Corners, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Baczko, M., Sachs, I., Vinaver, K., & Zakrzewski, P. (1977). *Techniques douces, habitat et société*. Paris: Éd. Etente.
- Britannica, T. (07 de December de 2018). *Thermal radiation*. Obtenido de Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/thermal-radiation>
- Britannica, T. (08 de April de 2020). *Planck's radiation law*. Obtenido de Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/Plancks-radiation-law>
- Callen, H. (1985). *Thermodynamics and a Introduction to Thermostatistics*. New York: John Wiley & Sons.
- Carl Mahoney and Associates. (30 de Septiembre de 2002). *Carl Mahoney*. Recuperado el 24 de Febrero de 2021, de Carl Mahoney and Associates: <http://cma.alphalink.com.au/carlm.html>
- Design Builder Latinoamérica. (2018). *Design Builder Lat*. Obtenido de <https://www.designbuilder-lat.com/>
- Dreyfus, J. (1960). *Le confort dans l'habitat en pays tropical: la protection des constructions contre la chaleur; problèmes de ventilation*. Paris: Editions Eyrolles.

- Drysdale, J., & Commonwealth Experimental Building Station, A. (1949). *Climate and design of buildings*. North Ryde, N.S.W: Commonwealth Experimental Building Station.
- Esparza-López, C., Gómez-Amador, A., Escobar, C., Elizondo, M., & Gómez-Azpeitia, G. (2016). Experimental analysis of a humid fiber as an indirect evaporative cooling device against roofpond and gunny bags in a hot sub-humid climate. En P. La Roche, & M. Schiler (Ed.), *PLEA 2016 Los Angeles – 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments. I*, págs. 1368-1374. Los Angeles: California State Polytechnic University Pomona.
- Evans, J. (2007). *The Comfort Triangles: a new tool for bioclimatic design. (PhD Thesis)*. Netherlands: Technische Universiteit Delft.
- Galindo-Estrada, I.G. (2010), Ponencia *Identificación y estudios de las islas urbanas de calor de las ciudades de Guadalajara y Colima, propuestas de estrategias de mitigación*, Primer Encuentro Académico Conavi-Conacyt.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Hernández, E. (1983). A B C de la climatización natural mediante el uso directo e indirecto de la energía solar. *La Revista Solar*(6), 163-168.
- Howard, L. (2006). *The climate of London*. Ed. de la International Association for Urban Climate, a partir de la edición en tres volúmenes de 1834. Göteborg, Sweden, 221 p,
- INECC-PNUD (2017a). *Estimación de rangos de incertidumbre en las fechas para alcanzar los valores de incremento en la temperatura promedio global 1.0, 1.5 y 2.0 °C y las implicaciones para la República*

- Mexicana como producto de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Estudio elaborado por Oscar Casimiro Sánchez Menezes, 29 pp., México.
- INECC-PNUD (2017b). *Estudio de Análisis de las condiciones del bioclima humano en ciudades mexicanas ante escenarios de cambio climático para los horizontes temporales en los que se alcance un incremento en la temperatura media global de 1 °C, 1.5 °C y 2 °C*. Proyecto 85488 Sexta Comunicación Nacional a la CMNUCC. Adalberto Tejeda Martínez. México. 47 pp
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- IPCC (2013): *Cambio Climático 2013: La base científica. Contribución del Grupo de Trabajo del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático*, [Equipo de redacción principal: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, B. M.]. Cambridge University Press. 1535 pp. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2018). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of*

- strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)].
- IPCC. (2022 a.). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (P. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, M. Pathak, S. Some, . . . J. Malley, Edits.) Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926.001
- Izard, J., & Guyot, A. (1980). *Arquitectura Bioclimática*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Izard, J., & Vlemincx, D. (2006). *Les Indicateurs de L'Architecture Bioclimatique*. ENSA-Marseille, Laboratoire ABC. Marseille: EnviroBAT-Méditerranée. Obtenido de <https://www.enviro-boite.net/les-indicateurs-de-l-architecture-bioclimatique>
- Jáuregui, E. (1986). Tropical urban climates. Review and assessment. En T. Oke (Ed.), *Climatology and its applications with Special Regard to Tropical Areas*. 652, págs. 26-45. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la ciudad de México*. Plaza y Valdés, México, D.F., 129 p.
- Jáuregui, E. y Tejeda A. (1997). Urban rural humidity contrasts in México City. *Int. J. of Climatology*, 17, 1–10.
- Jáuregui, E. y Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *Int. J. of Climatology*, 19, 683–694.

- Jiménez Bernal, J., Gutiérrez Torres, C., & Barbosa Saldaña, J. (2014). *Termodinámica*. México: Grupo Editorial Patria.
- Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., & Livada, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83, 538–551. Obtenido de https://www.academia.edu/17788636/Development_and_testing_of_thermochromic_coatings_for_buildings_and_urban_structures
- Königsberger, O. H., Ingersoll, T. G., Mayhew, A., & Szokolay, S. V. (1977). *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Madrid: Paraninfo.
- Königsberger, O. H., Mahoney, C. T., & Evans, J. M. (1971). *Climate and House Design*. United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs, Centre for Housing, Building, and Planning.
- Königsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., & Szokolay, S. (1974). *Manual of Tropical Housing and Building*. London: Longmans.
- Königsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., & Szokolay, S. (2013). *Manual of Tropical Housing and Building* (First e-edition ed.). Hyderabad, India: Universities Press. Obtenido de https://www.academia.edu/30105808/Manualoftropicalhousing_koenigsberger_150824122547_lva1_app
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic Press., Nueva York, 269 p.
- Los, S. (1983). Passive solar systems versus architecture. En S. Yanas (Ed.), *The Second International PLEA Conference*. (págs. 837-842). Crete: Pergamon Press. doi:10.1016/B978-0-08-030581-3.50103-1
- Luyando-López, E. (2016), *Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad*

- de México por cambio climático local y global*, Tesis de doctorado en Geografía, UNAM, 177 p.
- Méndez-Pérez, I. (2015). Bases físicas de la radiación. En A. Tejada-Martínez, & G. Gómez-Azpeitia, *Prontuario solar de México* (págs. 33-49). Colima: Universidad de Colima y Universidad Veracruzana.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Neira Alva, E. (1975). Sol, trópico y medio ambiente. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. Sao Paulo.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. 2ª edición. Mathuen and Co. LTD, Londres y Nueva York, 435 p.
- Oke, T. R., Mills, A. Christen y J. A. Voogt (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 509 p.
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- SEMARNAT-INECC (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marcod e las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, 751 p. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es> (consultada; junio 25 de 2020)
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y Energía Natural*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architecture Science. The basis of sustainable design*. Oxford, UK: Elsevier LTD.
- Tejada-Martínez, A., & Jáuregui-Ostos, E. (2004). Cuatro décadas de climatología urbana en México. En M. Rodríguez-Viqueira

- (Ed.), *Estudios de Arquitectura Bioclimática* (Vol. 6, págs. 163-178). México: LIMUSA- UAM Iztapalapa.
- Tejeda-Martínez, A., y Jáuregui-Ostos, E. (2005). Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review. *Atmósfera*, 18(1), 1-23.
- Tejeda-Martínez, A., I.R. Méndez-Pérez y D.A. Cruz-Pastrana (2021). Domestic electricity consumption in Mexican metropolitan areas under climate change scenarios. *Atmósfera*, Early Online Release, <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52902>
- Tudela, F. (1982). *Ecodiseño*. México, D.F.: UAM-X.
- U.S. Department of Energy. (27 de March de 2020). *Energy Plus Essentials*. Obtenido de Energy Plus Documentation: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.3.0/EnergyPlusEssentials.pdf
- Vidrio inteligente*. (09 de octubre de 2019). Recuperado el 25 de marzo de 2021, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio_inteligente

SEGUNDA PARTE
CÁLCULOS Y EJERCICIOS PRÁCTICOS CON
*bioclimarq*²⁰²³

5. *bioclimarq*, SOFTWARE DE APOYO PARA EL DISEÑO

5.1 Descripción del programa

bioclimarq forma parte de un selecto grupo de herramientas resueltas en libros de Excel, que han sido utilizadas en América Latina con fines didácticos en la formación de arquitectos y especialistas. Entre ellas destacan *BAT (Bioclimatic Analysis Tool)* desarrollado por Víctor Fuentes Freixanet (Fuentes Freixanet & Rincón Martínez, 2016), en México; CLIMANALISIS (Análisis climático para diseño de edificaciones) desarrollado por Eduardo González Cruz (González Cruz, 2019), en Venezuela; y e-CLIM (Análisis de clima y confort) desarrollado por John Martin Evans (Evans, 2004), en Argentina.

bioclimarq, por su parte, ha sido desarrollada por Gabriel Gómez-Azpeitia en diferentes momentos desde fines del siglo XX, a partir de segmentos aislados que fueron articulándose, como apoyo para estudiantes de posgrado en arquitectura de la Universidad de Colima, en México y, desde 2001, de la Escuela de Arquitectura y Diseño ISTHMUS de Panamá. En sus diversas etapas de desarrollo, ya sea en partes o de forma integrada, fue usada también en cursos y diplomados impartidos en universidades y asociaciones gremiales de México, Panamá, Colombia y España.

La herramienta empezó a tomar la forma que hoy tiene hacia fines del primer decenio de este siglo, hasta que en 2016 alcanzó una articulación satisfactoria y completa con la mayoría de sus componentes actuales. Entonces fue sometida a una revisión por parte de Quirino (2019), consistente en:

Validar datos horarios de temperatura y humedad, generados con el procedimiento de Tejeda (1991), con respecto a la información obtenida de la Red Nacional de Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME, operada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED) y otras estaciones seleccionadas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México;

Validar cualitativa y cuantitativamente la caracterización climática mediante la comparación con datos observados en diferentes puntos específicos de la República Mexicana; y

Cuantificar la sensibilidad y pertinencia de los índices térmicos usados para la caracterización climática.

Al finalizar la revisión, *bioclimarq* logró una operatividad satisfactoria lo que ha permitido ofrecerla para fines más allá de los estrictamente académicos, como apoyo a las tareas de arquitectos, urbanistas y diseñadores en la toma de decisiones referentes al análisis del clima y las exigencias de ahorro energético y confort térmico en la etapa inicial de prediseño.

Si bien en la actualidad existe la tecnología para convertir a *bioclimarq* a lenguajes de programación que harían su manejo más llamativo, el uso de Excel sigue siendo de amplia difusión y manejable en cualquier computadora personal, por lo que se ha decidido mantener esa plataforma.

Los resultados que genera el programa se sintetizan en dieciséis productos organizados en tres bloques temáticos:

1. Caracterización climática,
2. Diagnóstico bioclimático, y
3. Recomendaciones de climatización.

Estos bloques –explicados a continuación– corresponden a las tres primeras fases del método para el diseño con enfoque bioclimático propuesto en el apartado 4.1 de este libro.

Como parte de este libro se incluye la versión 2023 la cual puede descargarse en: [bioclimarq²⁰²³](#)

5.1.1 Caracterización climática

El trabajo involucrado en el primer bloque se resuelve mediante dos procesos básicos. El primero consiste en la introducción, por parte del usuario, de la información geográfica, climática y de hábitos de adaptación de las personas del lugar del proyecto (tipo de ropa, abertura de ventanas y uso de equipos de climatización artificial). Eso implica que el usuario deba conocer las costumbres locales y contar con una fuente confiable que disponga de datos climáticos normalizados, usualmente denominados “normales climáticas”.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO) define a las normales climáticas como las medias de los datos de clima “calculadas para un período uniforme y relativamente largo que comprenda por lo menos tres períodos consecutivos de 10 años” (WMO, 2017, pág. 3). En ese sentido, la WMO considera *normales reglamentarias* a las que provienen de datos registrados durante las tres décadas previas al decenio actual, lo que implica que cada diez años deben renovarse. Sin embargo, la WMO reconoce la dificultad para compilar registros completos y de buena calidad, por lo que propone “alcanzar un equilibrio entre [...] potenciar al máximo la integridad de los datos empleados en las normales y [...] contar con una cantidad sustancial de estaciones [...] de modo que se puedan calcular normales “verdaderas” (esto es, las normales que se obtendrían de datos completos) con un nivel de incertidumbre aceptable” (WMO, 2017, pág. 4).

La razón de que no se recomiende usar datos provenientes de un solo año, es que tales datos podrían estar sesgados por la posible ocurrencia de anomalías, por ejemplo, si fue un año inusualmente cálido, frío, seco o lluvioso. Si no hubiera data correspondiente a varios años del sitio en cuestión, lo mejor será buscar un sitio cercano, con la mayor semejanza climática posible, pero que disponga de información normalizada, o cuando menos, correspondiente a varios años de registro.

Ahora bien, las dificultades que puede encontrar el usuario de *bioclimarq* no sólo se limitan a que los datos climáticos públicos puedan considerarse o no como normales “verdaderas”, según criterios de la WMO, sino que puede darse el caso de que ciertos elementos climáticos necesarios para el desarrollo de la caracterización, ni siquiera se registran o publican en los reportes oficiales de algunos países, como sucede con los datos de humedad atmosférica, radiación solar o brillo solar efectivo, en México. En esos casos *bioclimarq* realiza estimaciones basadas en ecuaciones validadas previamente por diferentes autores, en su mayoría citadas en el capítulo 2 de este libro, o bien validadas especialmente para este software, de tal manera que puede operar satisfactoriamente, aunque sólo se le introduzcan datos mensuales de temperatura media máxima, temperatura media mínima y precipitación pluvial media total. Sobra decir que siempre será mejor trabajar con datos observados que con estimados, pero para efectos de recomendar estrategias de climatización, la aproximación inducida por el uso de datos estimados es aceptable.

El segundo proceso consiste en la determinación de las necesidades de enfriamiento y/o calefacción que se derivan de las condiciones mensuales de temperatura y humedad del sitio, integrados en un solo valor en términos del índice de temperatura efectiva estándar (SET, véanse los apartados 3.3.2 y 5.2). Así, los datos horarios de SET se confrontan con los límites de confort provenientes de la norma ANSI/ASHRAE 55 (2021) con tres posibles situaciones:

1. Si hay valores de SET que sobrepasan el límite superior de confort queda determinada la necesidad de enfriamiento para ese mes;
2. Si quedan por abajo del límite inferior de confort se establece la necesidad de calentamiento;
3. Si quedan inscritos dentro del rango de confort no hay necesidad de climatización especial.

Como resultado de este procedimiento se identifican los meses que comparten una misma demanda de climatización, configurando así temporadas climáticas bien diferenciadas a lo largo del año. De esta forma, el clima del sitio queda caracterizado según su variabilidad anual en tres condiciones posibles:

1. Estable: no presenta diferencias notables a lo largo del año.
2. Diverso: presenta dos temporadas diferentes en el año.
3. Extremoso: presenta tres temporadas en el año, situación común en lugares desérticos.

Una vez conocida la variabilidad anual del clima en el sitio, se establecen sus características, tanto para las temporadas identificadas como para el periodo anual en su conjunto. Las alternativas posibles son:

1. Cuando las condiciones predominantes determinan necesidad de enfriamiento, el periodo se caracteriza como cálido.
2. Cuando las condiciones predominantes demandan calentamiento, el periodo se caracteriza como frío.
3. Cuando las condiciones predominantes exigen tanto calentamiento como enfriamiento en un mismo periodo, se caracteriza entonces como de amplia oscilación térmica (si se trata de clima estable o diverso), o bien, como extremoso.
4. Cuando las condiciones predominantes no requieren climatización, el periodo se caracteriza como neutro.

Los resultados generados en este bloque se presentan en cinco hojas que contienen:

- *Tabla de temperaturas y humedades relativas horarias,*
- *Resumen de temperaturas,*
- *Resumen de humedades,*
- *Resumen de radiación solar, y*
- *Resumen de clima:* Producto terminal del bloque consistente en la caracterización del clima del sitio, tanto para el perio-

do anual como para las temporadas identificadas. Incluye el escenario por cambio climático estimado para mediados de siglo.

5.1.2. Diagnóstico bioclimático

El segundo bloque operativo tiene como objetivo realizar un diagnóstico de confort térmico a partir de las características del clima determinadas en la sección anterior. Para ello, el programa somete los datos climáticos a diversos instrumentos de evaluación bioclimática, tanto de manera anual, como por cada una de las temporadas identificadas. Los procesos que ejecuta el programa consisten en confrontar los datos de SET contra diferentes parámetros de confort térmico, tanto de enfoque predictivo como adaptativo (véase el apartado 3.3.3).

El enfoque predictivo se realiza mediante la versión para edificios climatizados de la norma 55 de ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021), la cual se basa en los índices *voto medio predicho* (PMV) y *porcentaje de personas insatisfechas* (PPD) de Fanger (1972). Por su parte, el enfoque adaptativo se solventa con la versión para edificios libremente ventilados de la misma norma (ANSI/ASHRAE, 2021), basada en el metaanálisis realizado por Dear y Brager (1998). También se incluyen, dentro del criterio adaptativo, las cartas de evaluación bioclimática propuestas por Olgyay (1963), Givoni (1998), Szokolay (2008) y Evans (2007) (en el apartado 3.3.4 de este libro, se explica a detalle el contenido de estas cartas).

De lo anterior se desprenden los requerimientos bioclimáticos para el proyecto, que pueden ser de enfriamiento, de calentamiento o mixto para periodos de amplia oscilación térmica que exigen la realización de ambas tareas. Una vez determinados los requerimientos, se identifican las estrategias de climatización aplicables de entre cinco alternativas, dos para calentamiento y tres para enfriamiento (tabla 5.1).

Tabla 5.1 Estrategias de climatización consideradas en *bioclimarq.*

<i>RC*</i>	<i>Estrategia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de medio</i>	<i>Indicada para condiciones</i>
Calentamiento	Ganancia solar (GS)	Captación de radiación solar y su disipación en forma de calor en las áreas habitables. Como las horas más frías ocurren cuando no hay sol, requiere de la inercia térmica (IT) del edificio.	Pasivo	Frías
	Calefacción (H)	Calor radiante generado por combustión de biomasa o hidrocarburos, o bien, por flujo eléctrico en circuitos de alta resistencia.	Activo	
Enfriamiento	Ventilación (V)	Captación y/o inducción de corrientes de aire para propiciar sensación de enfriamiento sobre la piel de las personas. El caso particular de la ventilación nocturna puede ser muy efectiva para condiciones de calor seco y cielos despejados. Su efecto refrigerante requiere de la inercia térmica (IT) del edificio.	Pasivo si aprovecha la ventilación natural y las peculiaridades de la envolvente arquitectónica.	Cálidas húmedas o subhúmedas
			Activo si hace uso de ventiladores mecánicos cuyo control puede ser operado por los usuarios.	
	Enfriamiento evaporativo (EE)	Incorporación de moléculas de agua al aire mediante un proceso de evaporación. Cuando el calor necesario para la evaporación se toma del aire, éste se enfría y a la vez se humedece. Se trata de enfriamiento evaporativo directo (EED).	Pasivo si el aire es tocado por agua proveniente de fuentes, corrientes, estanques, etc.	Cálidas secas o semisecas
			Activo si se emplean atomizadores automatizados o dispositivos de aire lavado comúnmente llamados "cooler".	
Aire acondicionado (AA)	Refrigeración generada mediante dos sistemas de intercambio de calor acoplados. En el primero, el gas refrigerante es comprimido hasta volverlo líquido. En el segundo, el refrigerante líquido vuelve a ser evaporado tomando el calor del aire ambiental, con lo que se enfría y deshumidifica.	Cuando el agua no entra en contacto directo con el aire sino a través del recipiente o el ducto que lo contiene, el calor necesario para la evaporación se toma de las paredes del dispositivo, enfriándolo y a su vez enfriando el aire ahí confinado o en tránsito, sin alterar su humedad. En este caso se trata de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)	Pasivo si el aire es conducido por ductos de alta conductividad térmica sumergidos en cuerpos o corrientes de agua subterráneos o superficiales a la sombra.	Cálidas secas o subhúmedas
		Activo si se emplean dispositivos mecánicos de enfriamiento evaporativo indirecto.		

*RC = Requerimiento de climatización

Tabla 5.2 Criterios para la delimitación de las estrategias de climatización consideradas en *bioclimarq.*

<i>Estrategia de climatización</i>	<i>Delimitación</i>
Ganancia solar más inercia térmica (GS + IT)	Recomendada para condiciones higrotérmicas (SET) situadas entre el límite inferior de confort (T_{inf}) y un límite determinado mediante el procedimiento propuesto por Szokolay (2008) a partir de parámetros ajustados para <i>bioclimarq.</i>
Ventilación (V)	Resulta útil para condiciones higrotérmicas (SET) ubicadas entre el límite superior de confort (T_{sup}) y un límite determinado mediante el procedimiento propuesto por Szokolay (2008) a partir de parámetros de eficiencia tomados de Givoni (1969)
Ventilación nocturna más inercia térmica (VN + IT)	Modalidad apropiada para condiciones higrotérmicas (SET) ubicadas entre el límite superior de confort (T_{sup}) y límites determinados por el procedimiento de Szokolay (2008) a partir de parámetros de eficiencia tomados de Givoni (1969).
Enfriamiento evaporativo (EE)	Apropiada para condiciones higrotérmicas (SET) situadas entre el límite superior de confort (T_{sup}) y límites fijos tomados de Olgyay (2015), Givoni (1969) y Szokolay (2008) para enfriamiento evaporativo directo (EED) e indirecto (EEI). El área delimitada para la aplicación de esta estrategia se traslapa parcialmente con el área correspondiente a la ventilación (área marcada con la abreviatura V + EE). Así, para las condiciones localizadas en esa área de traslape se recomienda combinar ambas estrategias.
Estrategias no pasivas: Calefacción (H) Aire acondicionado (AA)	Las condiciones higrotérmicas (SET) que quedan más allá de los límites determinados para las estrategias de climatización pasiva, deben ser asistidas mediante estrategias a base de energías activas. Para las condiciones frías se considera la calefacción (H), y para las condiciones cálidas se considera la ventilación mecánica superior a 1.5 m/s y/o la refrigeración mediante equipos de aire acondicionado (AA).

NOTA: Los procedimientos y parámetros que se mencionan en esta tabla se explican en el apartado 5.2 de este libro

La estrategia relacionada con la masa del edificio que genera efecto de inercia térmica (IT), si bien está incluida en las cartas bioclimáticas de Givoni, Szokolay y Evans, no fue considerada en la tabla 5.1, pues se basa en la materialidad del edificio que difícilmente puede ser mutable o practicable, según requerimiento de las diversas temporadas o incluso en función de la hora del día, como el resto de las estrategias. Adicionalmente, su efecto puede

ser benéfico para casi todas las posibles condiciones, sean de frío, neutras o de calor seco. Así, la IT se presenta en ese listado solamente como apoyo a otras estrategias para potenciar su efecto.

Los productos obtenidos en este bloque se presentan en seis hojas que contienen las estrategias identificadas como apropiadas por cada instrumento de evaluación, junto con el porcentaje de tiempo en que resultan útiles, lo que a su vez define su pertinencia. Ahí mismo, el usuario puede elegir resultados de diagnóstico actuales, o bien, que incluyan el efecto de la isla de calor urbano correspondiente, así como los incrementos esperados por cambio climático para los escenarios hacia 2050 y 2100. Las hojas corresponden a:

- *Carta de confort ASHRAE 55: 2020 (PMV y PPD),*
- *Carta de confort ASHRAE 55: 2020 (Adaptativo),*
- *Carta bioclimática de Olgyay,*
- *Carta bioclimática para edificios (BBCC) de Givoni,*
- *Carta bioclimática de Szokolay, y*
- *Triángulos de Confort de Evans*

A pesar de que los límites de confort térmico que considera cada instrumento de diagnóstico bioclimático difieren entre sí, los requerimientos de climatización resultantes coinciden razonablemente. Lo mismo sucede con las estrategias de climatización, aunque con diferencias un poco más evidentes. Por ejemplo, algunos instrumentos no contemplan técnicas incluidas por otros, como son los casos de la norma ASHRAE (ANSI/ASHRAE, 2021) que sólo considera la ventilación —tanto para edificios climatizados como para libremente ventilados— y la carta de Olgyay, que únicamente observa estrategias de control exterior como la ventilación, la humidificación y el sombreado o soleado de las fachadas. El resto de las cartas bioclimáticas incluye además estrategias de control interior como el efecto de la masa térmica y su producto combinado con ventilación nocturna. Adicionalmente,

aun cuando coincidiesen las estrategias, los criterios para determinar los límites de acción de cada una de ellas, pueden variar según cada autor, y por consiguiente su ponderación de pertinencia. No obstante, las ventanas de aplicación generadas por los diferentes instrumentos para cada estrategia considerada coinciden razonablemente, pues sus diferencias pueden considerarse mínimas.

Con el propósito de ofrecer un conjunto de estrategias de climatización unificado y suficientemente claro para el usuario, *bioclimarq* realiza un ejercicio de conciliación entre las diferentes variables de diagnóstico, utilizando los criterios enlistados en la tabla 5. 2, los cuales parten de los límites de confort propuestos por la norma ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE, 2021) en su versión adaptativa (ecuaciones 3.21 y 3.22 referidas en el apartado 3.3 de este libro).

El producto terminal de este bloque operativo se presenta en una séptima hoja, denominada *Resumen de diagnóstico bioclimático*, donde se puntualizan los parámetros de confort térmico que se emplearon para la evaluación, los requerimientos de climatización identificados por temporada, las recomendaciones de soleamiento anual y las estrategias de climatización más significativas para su consideración en el diseño. También se incluye la carta bioclimática síntesis de donde se originan las conclusiones del diagnóstico realizado por *bioclimarq*.

5.1.3. Recomendaciones de climatización.

El tercer bloque de *bioclimarq* efectúa una serie de rutinas programadas para traducir los requerimientos y estrategias de bioclimatización identificados, a tácticas particulares de carácter arquitectónico y/o constructivo que puedan ser incorporadas al proyecto desde sus esbozos iniciales. Para ello se usan dos métodos complementarios, el primero consiste en las tablas de Mahoney (Königsberger, Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 2013), cuyo producto

final es una serie de recomendaciones de diseño sobre once temas⁷⁶ (los términos entre paréntesis corresponden a los nombres originales puestos por Mahoney):

1. Configuración en planta (*Layout*)
2. Configuración espacial (*Spacing*)
3. Distribución espacial para efectos de ventilación (*Air movement*)
4. Tamaño de los vanos (*Size of openings*)
5. Posición de los vanos (*Position of openings*)
6. Protección de vanos contra la radiación solar (*Exclude direct sunlight*)
7. Protección de vanos contra la lluvia (*Provide protection from rain*);
8. Consistencia de muros y pisos (*Walls and floors*)
9. Consistencia de cubiertas (*Roofs*)
10. Uso de áreas exteriores como dormitorio (*Outdoor sleeping*)
11. Necesidad de drenaje en exteriores para evitar inundaciones (*Rain protection*)

El segundo método es el desarrollado por Serra y Coch (1995) cuyo producto final son recomendaciones sobre 12 temas⁷⁷ —expresados como coeficientes— organizados en dos grupos:

1. Forma general del edificio:
 - 1.1 Compacidad
 - 1.2 Porosidad

76. Los temas sobre el tamaño de vanos (4) y la consistencia de muros y cubiertas (8 y 9) están duplicados en el documento original de Mahoney, pues se incluyen tanto en la tabla 3 como en la tabla 4, lo que contabiliza 16 temas en total. Aquí se presenta la lista obviando tal reiteración.

77. La propuesta original contempla 13 coeficientes, pero Serra y Coch (1995, pág. 247) plantean que deben evitarse edificios altos cualquiera que sea el clima, en referencia al coeficiente de esbeltez. Como ese criterio no genera indicaciones específicas para climas diferentes, *bioclimarq* no lo incluye para la redacción de recomendaciones de este módulo.

2. Tratamiento de la “piel” del edificio:

1.1 Asentamiento

1.2 Adosamiento

1.3 Pesadez

1.4 Perforación

1.5 Transparencia

1.6 Aislamiento

1.7 Tersura

1.8 Textura

1.9 Color

1.10 Variabilidad de las características de la piel

Tanto las tablas de Mahoney como los coeficientes de Serra y Coch (explicados a detalle en la sección 4.1 de este libro) ofrecen al usuario sugerencias básicas para emprender el diseño de edificios, espacios y entornos urbanos en armonía con el clima del sitio. Ambos conjuntos de recomendaciones se presentan en las hojas:

- *Tablas de Mahoney*
- *Coefficientes de Serra y Coch*

Sin embargo, aunque por lo regular hay coincidencia entre los criterios de ambos procedimientos, puede ocurrir que recomendaciones propuestas por uno de los métodos difieran de lo sugerido por el otro. Así, al igual que en el anterior bloque, *bioclimarq* realiza una conciliación de criterios para ofrecer al usuario un conjunto de recomendaciones homogéneo y sin contradicciones. Para ello practica cuatro operaciones con los resultados obtenidos de ambos métodos en avenencia con las conclusiones previas de caracterización climática y diagnóstico bioclimático:

1. La primera operación consiste en asignar una escala numérica a las posibles alternativas que cada tema o coeficiente implica. El grado se asigna en función de la magnitud del trabajo que conlleva cada alternativa. Así, por ejemplo, en

el concepto de “tamaño de los vanos” de Mahoney (tema 4) se ofrecen cuatro alternativas posibles. A la opción “muy pequeños (entre 10% y 20% de la superficie de fachada)” le corresponde el punto 1 de la escala, mientras que la mayor, “grandes (entre 40% y 80% de la superficie de fachada)”, le corresponde el punto 4.

2. La segunda operación fusiona los temas de Mahoney que se corresponden con coeficientes de Serra y Coch, en tres nuevos atributos consolidados:
 - a. configuración en planta (1) y compacidad (1.1) se integran como *configuración en planta*;
 - b. tamaño de los vanos (4) y perforación (2.4) quedan como *tamaño de vanos*; y
 - c. muros y pisos (8), cubiertas (9), pesadez (2.3) y aislamiento (2.6) dan lugar a *densidad para efectos de inercia térmica*.

En estos casos, los grados asignados a los temas y coeficientes originales se promedian para determinar el valor que le corresponde al nuevo atributo consolidado.

3. La tercera operación tiene como propósito corregir dos vulnerabilidades detectadas en las tablas de Mahoney:
 - a. En los temas de muros, pisos y cubiertas (8 y 9) las recomendaciones se basan en el número de meses con demanda de inercia térmica, para muros y pisos, y ese mismo indicador más el número de meses con requerimiento de ventilación diurna, para cubiertas (Königsberger, Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 2013). La vulnerabilidad proviene de que omite el indicador de número de meses que requieren protección contra el frío, lo que excluye a los climas fríos de la recomendación de cerramientos masivos. Así, independientemente del valor consolidado para el atributo *densi-*

dad para efectos de inercia térmica, cuando se trata de una caracterización de clima estable predominantemente frío, se le asigna el grado máximo (4).

- b. En el tema de protección de vanos contra la radiación solar (6) Mahoney no permite gradación posible, pues sólo considera la recomendación de “sombreado total y permanente”, lo que excluye una gran diversidad de condiciones que requieren diferentes grados de sombreado parcial (Königsberger, Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 2013). En consecuencia, *bioclimarq* omite el grado asignado a este tema por las tablas de Mahoney, y lo determina en función a la recomendación de soleamiento anual procedente del diagnóstico bioclimático.
4. La última operación consiste en formular un sistema coherente de recomendaciones organizado en dos ámbitos, ocho conceptos y 19 atributos que sustituyen a los 23 órdenes originales (11 temas de Mahoney más 12 coeficientes de Serra y Coch) tal como se muestra en la tabla 5.3.

Una vez asignados los grados para cada atributo, *bioclimarq* correlaciona dicho valor con una sentencia específica que determina la táctica de bioclimatización correspondiente. El conjunto de tácticas recomendadas se presenta en forma de síntesis ejecutiva en una última hoja del programa, denominada *Resumen de recomendaciones de climatización*, que incluye tres apartados:

1. Configuración espacial y volumétrica;
2. Tratamiento de fachadas; y
3. Escenarios de cambio climático, basados en el estimado de incremento o decremento de las horas-grado de enfriamiento y de calentamiento para los horizontes de mediodos y de fin de siglo.

Tabla 5.3 Sistema para la formulación de recomendaciones de climatización en *bioclimarq*.

<i>Ámbito</i>	<i>Concepto</i>	<i>Atributo</i>	<i>Temas de Maboney</i>	<i>Coefficientes de Serra & Coch</i>	<i>Casos especiales</i>
<i>Configuración espacial y volumétrica</i>	Implantación	Configuración en planta ***	1	1.1	
		Dispersión sobre el terreno	2		
	Distribución	Organización espacial	3		
		Inclusión de patios		1.2	
	Proximidad	Contacto con otros edificios		2.1	
		Contacto con el suelo		2.2	
	Consistencia	Densidad para efectos de inercia térmica ***	8 y 9	2.3 y 2.6	Climas estables fríos*
	Adaptabilidad	Adaptabilidad espacial	10		
Prevención ante riesgo pluvial		11			
<i>Tratamiento de fachadas</i>	Macizo	Morfología superficial		2.7	
		Textura superficial		2.8	
		Color		2.9	
	Vanos	Tamaño ***	4	2.4	
		Configuración para inducir ventilación	5		
		Protección solar	6		Soleamiento anual**
		Acristalamiento		2.5	
		Resguardo pluvial	7		
	Variabilidad	Mutabilidad y practicabilidad		2.10	

* Situación determinada en el bloque de caracterización climática.

** Situación determinada en el bloque de diagnóstico bioclimático.

*** Atributos consolidados (en fondo gris)

5.2 Métodos de cálculo y estimación de datos

Como se mencionó en el apartado anterior, *bioclimarq* estima los datos necesarios para la ejecución del programa que, por algún motivo, no están disponibles para el usuario. Además de resolver la carencia de esa información, *bioclimarq* también realiza una serie de cálculos y rutinas necesarios para la operatividad del programa. Así, en este apartado se presentan las fórmulas utilizadas para esas tareas organizadas en tres secciones:

1. Datos climáticos que deben ser introducidos por el usuario;
2. Datos climáticos que no forman parte de la información básica solicitada al usuario; y
3. Variables, índices, indicadores y estándares necesarios para la operación del programa.

5.2.1 Información climática no disponible para el usuario

Para afrontar la posible carencia de información de los elementos climáticos marcados con asterisco en el apartado *Normales Climatológicas* de la carátula (humedad relativa, radiación solar y brillo solar efectivo), *bioclimarq* realiza estimaciones basadas en los siguientes procedimientos:

a. Para estimar los datos de **humedad relativa (HR) media mensual:**

Primero se calcula la presión de vapor de saturación (e_s) en hPa, según aproximación polinomial de Tejeda-Martínez (1994), donde T es la temperatura en °C:

$$e_s = 6.63 + 0.458T + 4.6 \times 10^{(-3)}T^2 + 6.6 \times 10^{(-4)}T^3 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Esta fórmula se aplica tres veces, cada una con la temperatura media (T_{med}), máxima (T_{max}) y mínima (T_{min}) para obtener en consecuencia los valores de presión de vapor de saturación media ($e_{s med}$), máxima ($e_{s max}$) y mínima ($e_{s min}$).

Como siguiente paso, se estima la presión de vapor (e en hPa) media mensual a partir de la temperatura mínima media mensual (T_{min} en °C), con la propuesta de Tejeda y Rivas (2003):⁷⁸

$$e = 7.5 + 8.5 \times 10^{-2}T_{min} + 3.7 \times 10^{-2}T_{min}^2 - 1.710^{-3}T_{min}^3 + 1.9 \times 10^{-4}T_{min}^4 - 5.0 \times 10^{-6}T_{min}^5 \quad \text{Ec. 5.1}$$

Así, los valores de humedad relativa se obtienen de la siguiente forma:

78. Esta es una aproximación más sencilla que la ecuación 3.13, la cual depende de la temperatura de punto de rocío.

$$HR_{med} = \frac{e}{e_{s\ med}} 100 \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$HR_{min} = \frac{e}{e_{s\ max}} 100 \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$HR_{max} = 2HR_{med} - HR_{min} \quad \text{Ec. 5.4}$$

donde:

HR_{med} Humedad relativa promedio en %.

HR_{min} Humedad relativa mínima en %.

HR_{max} Humedad relativa máxima en %.

b. Para estimar los datos de radiación media sobre el plano horizontal (radiación solar global, Q_g)⁷⁹:

Este dato es necesario para determinar el potencial de aplicabilidad de la estrategia de ganancia solar pasiva incluida en las cartas bioclimáticas de Givoni (BBCC) y Szokolay (véase el apartado 3.3.4). Para ello se deben realizar diversos procedimientos.

Primero se determina el ángulo horario formado por el rayo solar y el plano meridional del sitio, a la hora del amanecer:

$$\cos(\omega_{1\ 15}) = -\tan(\varphi)\tan(\delta s_{15}) \quad \text{Ec. 5.5}$$

(Rehman & Halawani, 1997) y (Duffie & Beckman, 2000)

donde:

$\omega_{1\ (15)}$ Ángulo horario al amanecer del día 15 de un mes determinado, en °

φ Latitud del sitio en °

δs_{15} Declinación solar del día 15 de un mes determinado, en °. Es el ángulo formado por el plano que contiene al eje de rotación terrestre y el plano perpendicular a la eclíptica. Se calcula con la siguiente ecuación:

79. Los procedimientos para obtener este dato también están descritos en Tejada-Martínez y Gómez-Azpeitia (2015).

$$\delta s = \varepsilon_{ob} \operatorname{sen} \left[\frac{360 (284 + n_j)}{365} \right] \quad \text{Ec. 5.6}$$

(Olgyay, 1963) y (Duffie & Beckman, 2000)

donde:

ε_{ob} Ángulo de oblicuidad de la eclíptica considerado como constante: 23.45°

n_j Día juliano del año: 1 corresponde al 1 de enero, 365 corresponde al 31 de diciembre.

En seguida se calcula la radiación que llega a un plano horizontal al tope de la atmósfera, en el día en cuestión:

$$Q_{et} = \left(\frac{24}{\pi} \right) Ic \left[(\cos(\varphi) \cos(\delta s) \operatorname{sen}(\omega_1)) + (\omega_1 \operatorname{sen}(\varphi) \operatorname{sen}(\delta s)) \right] \quad \text{Ec. 5.7}$$

(Duffie & Beckman, 2000)

donde:

Q_{et} Radiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2 .

Ic Constante solar = $1367 \text{ W}/\text{m}^2$.

φ Latitud del sitio.

δs Declinación solar del día.

ω_1 Ángulo horario al amanecer del día, en radianes.

Y finalmente, el dato buscado se determina mediante la fórmula de Glover y McCulloch (1958):

$$Q_g = Q_{et} \left[(0.29 \cos(\varphi)) (0.52 (S_{en})) \right] \quad \text{Ec. 5.8}$$

donde:

Q_g Radiación diaria global en W/m^2 día sobre plano horizontal.

Q_{et} Radiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2 (Ec. 5.7).

0.29 y 052 Constantes de reducción por efectos del cruce de la atmósfera y la nubosidad, determinadas por Glover y McCulloch (1958)

φ Latitud del sitio.

S_{en} Factor de soleamiento efectivo

Ahora bien, el factor de soleamiento efectivo (S_{en}) se determina mediante la siguiente expresión:

$$S_{en} = \frac{BS_f}{BS_a} \quad \text{Ec. 5.9}$$

donde:

S_{en} Factor de soleamiento efectivo.

BS_f Brillo solar efectivo día-mes: número de horas reales diarias de sol, obtenidas a partir de datos heliográficos o de promedios estadísticos mensuales. Para los casos de cielo completamente nublado, toma el valor de 0, para el resto de los casos tiene un valor positivo.

BS_a Brillo solar astronómico, número de horas diarias de sol. Se obtiene de la ecuación:

$$BS_a = \frac{2}{15 \omega_1(15)} \quad \text{Ec. 5.10}$$

donde:

$\omega_1(15)$ Ángulo horario del amanecer medio del mes, en grados, calculado para el día 15 del mes (Ec. 5.4).

*c. Para estimar los datos de **brillo solar efectivo (BS)**:*

Como éste es un elemento imprescindible para determinar el factor de soleamiento efectivo (S_{en}), y no existe en la literatura científica una fórmula para estimarlo, se hizo un análisis de correlación entre los datos de precipitación pluvial (PPT) y la fracción de soleamiento efectivo por nubosidad (S_{en}), mediante regresión estadística a partir de 684 datos mensuales registrados en 57 esta-

ciones u observatorios meteorológicos de la república mexicana durante el periodo 1941-1970 (SARH, 1982)⁸⁰. Para esta correlación, la fracción de , se calculó mediante la fórmula de Tejeda y Vargas (1996) a partir de los datos registrados del número de días despejados (Dd) y días medio nublados (Dmn) de cada mes:

$$S_{en}^* = \left[0.31 + 0.48 \left(\frac{Dd + 0.5Dmn}{Dm} \right) BS_a \right] \quad \text{Ec. 5.11}$$

donde:

S_{en}^* Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de nublados típicos.

Dd Número de días despejados al mes.

Dmn Número de días medio nublados al mes.

Dm Número de días del mes en cuestión.

BS_a Brillo solar astronómico, número de horas diarias de sol (Ec. 5.10).

Tras aplicar diversas modalidades de regresión, se encontró que la regresión logarítmica arrojó un ajuste aceptable entre los datos registrados y los estimados, con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.555$ y una raíz de error cuadrático medio RMSE= 0.00938 (figura 5.1).

Consecuentemente, a falta de información disponible de brillo solar efectivo BS_p , *bioclimarq* estima la fracción de soleamiento efectivo a partir de la precipitación pluvial (S_{en}'), mediante la siguiente fórmula:

$$S_{en}' = -0.042 \ln(PPT) + 0.7098 \quad \text{Ec. 5.12}$$

donde:

S_{en}' Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de la precipitación pluvial.

80. Se tomaron estas normales climáticas, porque fue la última edición en que el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) incluyó los datos necesarios para determinar el factor de soleamiento efectivo.

\ln Logaritmo natural.

PPT Precipitación pluvial total del mes, en mm.

La fórmula Ec. 5.12 tiene un coeficiente de determinación $r^2 = 0.555$ y una raíz del error cuadrático medio $RMSE = 0.00938$ (figura 5.1), es decir, que en este modelo de regresión la precipitación explica en un 55.5 % la variación del soleamiento efectivo, con un error de una milésima en una escala de 0 a 1.

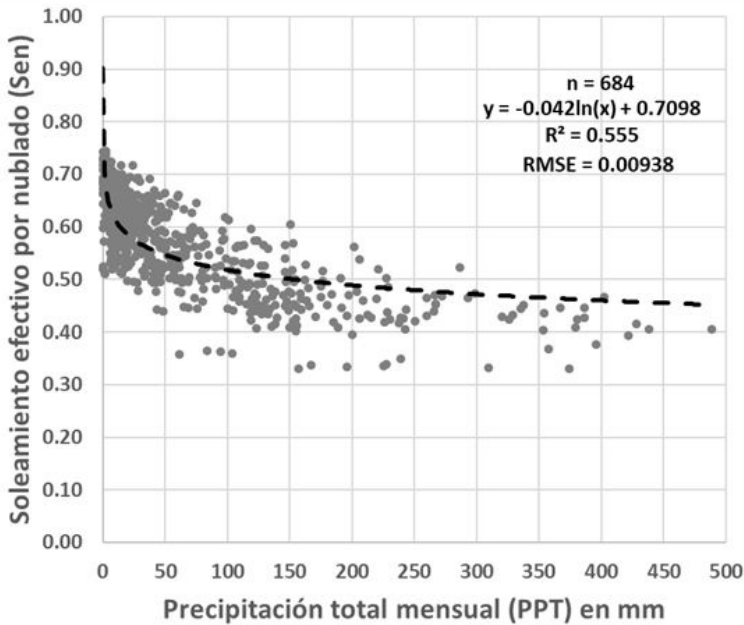


Figura 5.1. Regresión logarítmica de datos de precipitación pluvial total mensual (PPT) y fracción de soleamiento efectivo por nublado (S_{en}). Datos tomados de SARH (1982)..

5.2.2 Información climática no solicitada al usuario

Algunos datos necesarios para los procesos de cálculo de *bioclimarq*, no son requeridos para que el usuario los introduzca en la carátula, por lo que *bioclimarq* los obtiene a partir de los datos introducidos, mediante los siguientes procedimientos:

a. Para estimar los datos horarios de **temperatura** (T_{hor}) y **humedad** (HR_{hor} y $r_{w\ hor}$):

Dado que los diagnósticos de confort térmico se establecen en términos de un día *típico* de 24 horas para cada mes, es necesario determinar las condiciones de temperatura y humedad hora por hora de ese día *típico*, a fin de definir los horarios de oportunidad para las estrategias de climatización aplicables al sitio. Estos no son datos que pueden encontrarse con facilidad en los bancos de información climática, de ahí que *bioclimarq* debe estimarlos a partir de los datos introducidos por el usuario. Para ello se aplica el procedimiento propuesto por Tejeda-Martínez (1991)⁸¹ que determina la temperatura hora por hora, a partir de los valores medios mensuales de temperatura:

$$T_{hor} = \bar{T}_{min} + (at^b \exp^{ct}) (\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min}) \quad \text{Ec. 5.13}$$

donde:

- T_{hor} Temperatura a una hora determinada, en °C
- \bar{T}_{min} Temperatura mínima promedio mensual, en °C
- \bar{T}_{max} Temperatura máxima promedio mensual, °C
- t Tiempo transcurrido a partir de la hora del amanecer (en tiempo solar, no en tiempo civil), en h
- exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Los parámetros a , b y c toman los valores de la tabla 5.4

Tabla 5.4. Valores de a , b y c , como función de la latitud y época del año.

Meses	Latitud ° N	a	b	c
Marzo-octubre	> 23.5	0.026	3.190	-0.375
Noviembre-febrero	> 23.5	0.023	3.436	-0.421
Enero-diciembre	< 23.5	0.096	2.422	-0.339

81. El procedimiento se determinó a partir de datos normalizados de la república mexicana.

El mismo procedimiento se utiliza para calcular las humedades relativas horarias (HR_{hor}) sustituyendo los valores de temperatura (T) por los de humedad relativa (H_R):

$$HR_{hor} = \overline{HR}_{min} + (1 - at^b \exp^{ct}) (\overline{HR}_{max} - \overline{HR}_{min}) \quad \text{Ec. 5.14}$$

donde:

HR_{hor} Humedad relativa a una hora determinada, en %

\overline{HR}_{min} Humedad relativa mínima promedio mensual, en %

\overline{HR}_{max} Humedad relativa máxima promedio mensual, en %

t Tiempo transcurrido a partir de la hora amanecer (en tiempo solar, no en tiempo civil), en h

exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Los valores de a , b y c están en la tabla 5.4.

Para determinar los valores horarios de la razón de mezcla (r_w) a partir de los datos horarios de temperatura y humedad relativa, se emplea la siguiente fórmula:

$$r_w = 622 \frac{e}{P - e} \quad \text{Ec. 2.12}$$

(Tejeda-Martínez, Méndez Pérez, Rodríguez, & Tejeda Zacarías, 2018)

donde:

r_w Masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco, en gr/Kg

e Presión de vapor, en hPa, que se obtiene de:

$$HR = 100 \frac{e}{e_s} \quad \text{Ec. 2.10}$$

donde:

H_R Humedad relativa, en %

e Presión de vapor, hPa

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa:

$$e_s = 6.63 + 0.458T + 4.6 \times 10^{(-3)}T^2 + 6.6 \times 10^{(-4)}T^3 \quad \text{Ec. 2.7}$$

(Tejeda-Martínez A. , 1994)

donde:

T Temperatura, en °C

P Presión atmosférica del sitio, en hPa que se estima así:

$$P = 1008.4 - 0.102(Z) \quad \text{Ec. 5.15}$$

(Tejeda-Martínez, Conde-Álvarez, & Valencia-Treviso, 2008)

donde:

P Presión atmosférica del sitio, en hPa.

Z Altitud del sitio, en msnm.

Para ajustar los valores de temperatura y humedad horarias a la hora civil, se hace la siguiente corrección:

$$TC = -ET - 4(L' - L) + T_v \quad \text{Ec. 2.3}$$

donde:

TC Tiempo civil, en min

ET Ecuación del tiempo, en min

L' Longitud del huso horario, en °

L Longitud geográfica del sitio, en °

T_v Horario de verano para aquellas regiones que lo apliquen, en minutos a corregir por efecto del cambio de horario; 60 si se trata de horario de verano; 0 si se trata de horario de invierno o si no se practica el cambio de horario

La ecuación del tiempo ET , se expresa así:

$$ET = 9.87 \text{sen}(2f_{ET}) - 7.53 \text{cos}(f_{ET}) - 1.5 \text{sen}(f_{ET}) \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde:

ET Ecuación del tiempo, en minutos

f_{ET} Factor para la ecuación del tiempo, en °. Se determina así:

$$f_{ET} = 360 \frac{(n_j - 81)}{364} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde:

n_j Día juliano del año, 1 corresponde al 1 de enero, 365 corresponde al 31 de diciembre.

*b. Para determinar la **temperatura de bulbo húmedo** (T_w):*

Esta variable de temperatura que a su vez representa una forma indirecta de establecer las condiciones de humedad (véase el capítulo 2), se utiliza en las cartas bioclimáticas de Givoni (BBCC) y de Szokolay (véase el apartado 3.3.4), especialmente para determinar los límites de aplicación de las estrategias de enfriamiento evaporativo directo e indirecto. Se estima mediante la siguiente expresión:

$$T_w = \frac{(T + T_d)}{2} \quad \text{Ec. 2.14}$$

(Knox, Nevius, & Knox, 2017)

donde:

T_w Temperatura de bulbo húmedo, en °C

T Temperatura, en °C

T_d Temperatura de punto de rocío, en °C, que se determina así:

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} \cdot [112 + (0.9T)] + (0.1T) - 112 \quad \text{Ec. 5.16}$$

(Tejeda-Martínez, Méndez Pérez, Rodríguez, & Tejeda Zaca-rías, 2018)

donde:

HR Humedad relativa, en %

T Temperatura, en °C

c. *Estimaciones de variaciones de temperatura (T), humedad relativa (H_R) y precipitación pluvial (PPT) por causas antropogénicas:*

El incremento de la temperatura ambiente por efecto de isla urbana de calor (IUC) es un fenómeno originado por múltiples factores, tales como el tipo de urbanización, los materiales empleados en la superficie urbana, la cantidad y tipo de vehículos en movimiento, etc. De la Figura 4.12 se infiere que el número de habitantes de la ciudad (P_c) se relaciona con la intensidad máxima de la isla urbana de calor (IC_{max}) así:

$$IC_{max} = 2\log_{10}P_c - 8 \quad \text{Ec. 4.12}$$

donde:

IC_{max} Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica, en K

P_c Población de una ciudad, en número de habitantes

Ahora bien, esta estimación no puede aplicarse a todo un asentamiento urbano, pues un valor de intensidad media podría estimarse en la cuarta parte de la intensidad máxima (ver apartado 4.2). Con esta base, *bioclimarq* estima el incremento de temperatura por efecto de la isla urbana de calor, tomando en cuenta la ubicación del lote dentro de la zona urbana, con la siguiente expresión:

$$\Delta T_{IUC} = IC_{max} \cdot f_{IUC} \quad \text{Ec. 5.17}$$

donde:

ΔT_{IUC} Incremento de temperatura por IUC según localización, en K

IC_{max} Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica, en K (Ec. 4.12)

f_{IUC} Factor de localización en la isla urbana de calor, según la tabla 5.5:

Tabla 5.5. Valores de f_{IUC} en función de la localización en la zona urbana.

Localización	f_{IUC}
En el centro de la ciudad	1
Entre el centro y la periferia	0.33
En la periferia o localidad rururbana	0.08

Por su parte, el incremento en la temperatura por efecto del cambio climático incorporado en las opciones de *bioclimarq*, se basa en el escenario menos optimista, correspondiente a la RCP 8.5 —*business as usual*—, el cual considera que las emisiones continuarán aumentando durante el resto del siglo al ritmo que lo vienen haciendo (ver apartado 4.3). Bajo esa óptica, *bioclimarq* incrementa el valor de la temperatura (T) actual, de acuerdo con la tabla 5.6. A su vez, la humedad relativa se ve alterada en términos de las ecuaciones 2.7, 5.1 y 5.2 que dependen del valor de T .

Tabla 5.6. Incrementos de T estimados para escenarios de CC conforme a la RCP 8.5

Periodos			Unidad
Hasta 2040	2040-2075	2075-2100	
+ 1.0	+ 1.5	+ 2.0	K

bioclimarq plantea que las variaciones esperables en la precipitación pluvial (PPT) por efecto del cambio climático —que empezarían a ocurrir hasta después de 2040— responden a las alteraciones de nubosidad, que a su vez modificarían el factor de soleamiento efectivo (S_{en}), de acuerdo a:

$$S_{en\ CC} = S_{en} \cdot f_{sen\ CC} \quad \text{Ec. 5.18}$$

donde:

$S_{en\ cc}$ Factor de soleamiento efectivo modificado por cambio climático, adimensional

S_{en} Factor de soleamiento efectivo actual, adimensional

$f_{sen\ cc}$ Factor de alteración del soleamiento efectivo por cambio climático, adimensional, conforme a la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Factor de alteración del soleamiento efectivo por cambio climático ($f_{sen\ cc}$)

Condición actual	$S_{en} > 0.6$	$0.3 < S_{en} < 0.6$	$S_{en} < 0.3$	Unidad
$f_{sen\ cc}$	1.075	1.0	0.925	adimensional

Así, el valor probable de PPT se estima mediante la ecuación 5.12, despejada para PPT y sustituyendo el factor original S_{en} , por el modificado por cambio climático .

5.2.3 Parámetros, índices, indicadores y estándares

a. Para determinar la **temperatura efectiva estándar (SET)**:

Este índice equipara la temperatura que percibiría un sujeto imaginario en reposo (1.0 *met*) y arropamiento medio (0.6 *clo*) en un ambiente, imaginario también, que se encuentra a 50% de humedad relativa, con velocidad del aire leve (menor a 0.1 m/s) y donde no existe calor radiante ($T = T_{MR}$), con el que percibe una persona en el ambiente real, con niveles de vestimenta y actividad reales (ANSI/ASHRAE, 2021, pág. 5). Este índice se aplica en las cartas bioclimáticas de Szokolay y de la norma 55 de ANSI/ASHRAE (véase apartado 3.4). Así también, se utiliza para determinar la caracterización climática y el diagnóstico bioclimático de *bioclimarq* (véase apartado 5.1).

Como se aprecia en el diagrama psicrométrico de la figura 5.1, las líneas de temperatura efectiva estándar (SET) tienen una diferencia angular variable respecto de las líneas de temperatura (T), que son siempre verticales. La inclinación o pendiente de las líneas SET (m SET) sería entonces el parámetro determinante para definir cuales condiciones (T , r_w y H_R) quedan fuera o dentro de los límites que representan las líneas SET.

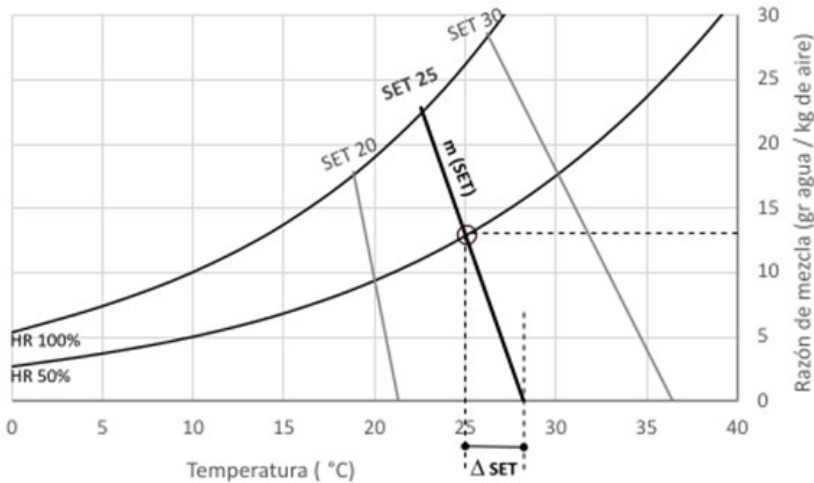


Figura 5.2. Determinación de las líneas de temperatura efectiva estándar (SET) en un diagrama psicrométrico.

Ahora bien, la pendiente de una recta se define por el cociente entre los catetos que la delimitan (la recta misma sería la hipotenusa). En este caso, la pendiente de una línea SET sería el resultado de:

$$m(SET) = \frac{r_w}{\Delta SET} \quad \text{Ec. 5.19}$$

donde:

$m(SET)$ Pendiente de la línea SET, adimensional

r_w Razón de mezcla a 50% de H_R , en gr/kg, a una temperatura T

ΔSET Diferencia de temperatura a 0% de HR, respecto de T , en K, que a su vez se define por:

$$\Delta SET = T \times 0.023(T - 14) \quad \text{Ec. 5.20}$$

(Szokolay, 2008)

donde:

T Temperatura, en °C.

Este procedimiento aplica sólo a temperaturas superiores a 14 °C. Para temperaturas iguales o menores a 14 °C se considera que no hay diferencia entre la SET y la T.

b. Para determinar los límites de la zona de confort:

Como se mencionó en el apartado 5.1, los instrumentos de diagnóstico bioclimático definen límites de confort diferentes debido al enfoque y fundamentos teóricos que consideran más apropiados. En seguida se presenta un resumen de tales criterios.

Norma ANSI/ASHRAE 55 para edificios climatizados

Este apartado de la norma se basa en el enfoque predictivo, y su zona de confort se determina con las líneas SET correspondientes a $PMV = 0.5$ (PPD = 10%) para el límite superior de confort, y $PMV = -0.5$ (PPD = 10%) para el límite inferior de confort. Estos parámetros se calculan así:

$$PMV = (0.303 \exp^{-0.036M} + 0.028)Lo \quad \text{Ec. 3.16}$$

donde:

PMV Voto medio predicho, adimensional

M Tasa Metabólica, en W/m^2

Lo Acumulación de calor en el cuerpo, en W/m^2

$$PPD = 100 - 95 \exp^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde:

PPD Porcentaje predicho de insatisfechos, adimensional

PMV Voto Medio predicho, adimensional

exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Para el cálculo de estas variables, *bioclimarq* ejecuta un proceso basado en el programa de cómputo disponible en el apéndice normativo B de la norma (ANSI/ASHRAE, 2021), en cuyo resultado final se incluye la corrección por el factor de expectativa f_e propuesto por Fanger y Toftum (2002) explicado en el apartado 3.3.3 de este libro (véase la tabla 3.4)

Para la determinación dinámica de la inclinación o pendiente de las líneas SET, *bioclimarq* toma como referencia la aplicación gratuita desarrollada por Tartarini, Schiavon, Cheung y otros (2020), disponible en <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>, la cual a su vez se basa en el programa de cómputo disponible en el apéndice normativo D4 de la norma (ANSI/ASHRAE, 2021).

Norma ANSI/ASHRAE 55 para edificios libremente ventilados

Este apartado especial de la norma se sujeta al enfoque adaptativo, y los límites de su zona de confort se derivan de las siguientes fórmulas (ANSI/ASHRAE, 2021):

$$T_{sup} = 0.31(\bar{T}_o) + 21.3 \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$T_{inf} = 0.31(\bar{T}_o) + 14.3 \quad \text{Ec. 3.22}$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

\bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Los límites de aplicabilidad de estas fórmulas corresponden a una \bar{T}_o entre 10 °C y 33.5 °C.

La norma ANSI/ASHRAE 55, tanto para edificios climatizados como para libremente ventilados, no considera límites de confort hídrico, ya que la SET lleva implícitas las condiciones de humedad como parte de la sensación térmica percibida.

Carta bioclimática de Olgay

La propuesta original de Olgay (1963) se publicó antes del desarrollo del enfoque adaptativo del confort térmico, pero los límites de su zona de confort, si bien estáticos, eran diferentes según

el tipo de clima, lo que indica que en el fondo Olgyay recelaba del determinismo implícito en el enfoque predictivo. Para resolver esa inconsistencia, *bioclimarq* determina los límites de la zona de confort de la carta de Olgyay aplicando la norma ANSI/ASHRAE 55 para edificios libremente ventilados, pero manteniendo el criterio original de dos amplitudes diferentes para el rango de confort (RC) según las condiciones térmicas prevalecientes:

Si $\bar{T}_o > 20$ °C las ecuaciones 3.21 y 3.22 se aplican sin cambio.

Si $\bar{T}_o < 20$ °C las ecuaciones se ajustan así:

$$T_{sup} = 0.31(\bar{T}_o) + 20.3 \quad \text{Ec. 5.21}$$

$$T_{inf} = 0.31(\bar{T}_o) + 15.3 \quad \text{Ec. 5.22}$$

donde:

T_{sup} = Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

T_{inf} = Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

\bar{T}_o = Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

El rango resultante de ± 2.5 K corresponde al estrato de 90% de aceptación de la norma ASHRAE 55.

Respecto a los límites de confort higríco, Olgyay plantea un rango de casi 60 puntos porcentuales, pues su zona de confort considera un límite inferior de 17.5 % y uno superior de 77%. También prevé que a partir de 50% de H_R , el rango de confort térmico (ya sea de ± 2.5 K o ± 3.5 K) se reduzca por una menor tolerancia al calor en la medida que el ambiente es más húmedo.

Carta bioclimática para edificios de Givoni

La propuesta original de Givoni (1969), al igual que el caso de Olgyay, se publicó antes del desarrollo del enfoque adaptativo, por lo tanto, comparte con él el criterio de establecer límites de confort estáticos, aunque con algunas variantes.

Givoni determina el límite inferior de confort térmico (T_{inf}) mediante el establecimiento de una temperatura base cuyo valor

depende de las condiciones térmicas prevalecientes. Si la temperatura promedio (\bar{T}_o) supera los 20 °C, entonces el T_{inf} se establece en 20 °C, si no, el T_{inf} se fija en 18 °C. Por su parte, para la determinación del límite superior de confort térmico (T_{sup}), Givoni revisó la vigencia del enfoque predictivo y planteó un rango de confort base cuya magnitud se define según las condiciones de temperatura y el grado de habituación de las personas al uso del aire acondicionado (Givoni, 1998). Así, si la $\bar{T}_o > 20$ °C y las personas no están habituadas al aire acondicionado, entonces el RC debe considerarse amplio, de 9 K. En todos los demás casos, el RC considerado es de 7 K (igual al RC de ± 3.5 K de la norma ANSI/ASHRAE 55). En consecuencia:

$$T_{sup} = T_{inf} + RC \quad \text{Ec. 5.23}$$

donde:

T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en °C

T_{inf} Temperatura límite inferior de confort, en °C:

Si $\bar{T}_o > 20$ °C entonces $T_{inf} = 20$ °C, si no, $T_{inf} = 18$ °C.

RC Rango de confort térmico, en K:

Si $\bar{T}_o > 20$ °C y las personas no están habituadas al aire acondicionado, entonces $RC = 9$ K, en todos los demás casos $RC = 7$ K.

En cuanto al confort higrico, Givoni coincide con Olgyay en establecer un límite superior de 80% de HR y de reducir el RC a partir del 50% de H_R , pero establece otros límites en función a la razón de mezcla (r_w). Así, considera su zona de confort a partir de 4 g/kg. El límite superior lo condiciona al grado de habituación de las personas al aire acondicionado: si no es generalizado se establece en 17 g/kg, de lo contrario se ajusta en 15 g/kg.

Carta bioclimática de Szokolay

Los límites de confort térmico de Szokolay (2008) se ajustan a lo estipulado en la norma ANSI/ASHRAE 55 para edificios libre-

mente ventilados (ecuaciones 3.21 y 3.22). Sin embargo, a pesar de que la carta se construye por medio del índice SET —que lleva implícito el efecto en la sensación térmica debido a la humedad—, Szokolay sobredimensiona ese efecto al establecer límites de confort higrúico que la norma ANSI/ASHRAE omite. Así, determina un límite inferior de 4 g/kg y uno superior de 12 g/kg de razón de mezcla. *bioclimarq* respeta esa consideración.

Triángulos de confort de Evans

Los triángulos de confort de Evans (2007) recurren al dato de oscilación térmica (TS_o) como representativo de las condiciones de humedad, en el entendido que a mayor contenido de vapor de agua en el aire, menor oscilación de temperaturas durante el periodo. Así, considera un rango de confort térmico (RC) de 10 K para condiciones lo más estables posibles ($TS_o = 0$). En esta hipotética situación los límites se determinan entre 18 °C y 28 °C, lo que implica una temperatura neutra de 23 °C. Sin embargo, conforme aumenta la oscilación térmica, y por lo tanto la humedad se reduce, el RC se angosta hasta llegar a un punto (la cúspide del triángulo donde el $RC = 0$). Esto ocurre en la ordenada 10 K de TS_o , pero se trata de una situación improbable (en la realidad el rango de confort no puede reducirse a sólo la temperatura neutra), por lo que Evans establece un límite superior de TS_o de 8 K en el lado de las temperaturas cálidas y de 7.5 K en el de temperaturas frías, lo que da un RC mínimo de 2.5 K. Esto hace que el triángulo de confort finalmente aparezca truncado.

Evans explica que la magnitud de su RC es bastante amplia como para absorber los ajustes que exige el enfoque adaptativo en función a las condiciones imperantes en cada sitio. No obstante, deja abierta la posibilidad de correr el triángulo de confort hacia la derecha, para ajustarse mejor a condiciones muy cálidas. *bioclimarq* así lo resuelve, por lo que en caso de que la \bar{T}_o supere los 20 °C,

la temperatura neutra se establece en 25 °C, y por lo tanto, los límites de confort se corren hacia los 20 °C y 30 °C ($RC = 10$ K) para una $TS_o = 0$.

Carta síntesis bioclimarq

En la carta síntesis que presenta la integración de resultados del diagnóstico bioclimático hecho por *bioclimarq*, la zona de confort se delimita de acuerdo con diferentes criterios. El límite superior se determina mediante la fórmula propuesta por la norma ANSI/ASHRAE 55 (2021) para edificios libremente ventilados:

$$T_{sup} = 0.31(\bar{T}_o) + 21.3 \quad \text{Ec. 3.21}$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

\bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

Con el fin de evitar una sobrerrepresentación de las necesidades reales de calentamiento a las horas cercanas al amanecer, sobre todo en lugares donde predominan las condiciones cálidas, se optó por sustituir la fórmula de la norma ANSI/ASHRAE 55 para el límite inferior de confort, por la temperatura base propuesta por Givoni (1998):

Si $\bar{T}_o > 20$ °C entonces $T_{inf} = 20$ °C, si no, $T_{inf} = 18$ °C.

donde:

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

\bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

La anterior sustitución no altera de manera significativa el diagnóstico para lugares donde predominan las condiciones frías, pues el resultado de la ecuación 3.22 para el límite de aplicabilidad

de la norma ($\bar{T}_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$) da un $T_{inf} = 17.4 \text{ }^\circ\text{C}$, apenas seis décimas de grado abajo del parámetro propuesto por Givoni. Además, en el caso de que las condiciones inscritas en la franja que queda entre el T_{inf} determinado por la fórmula de ANSI/ASHRAE y la temperatura base de Givoni pudieran generar sensación de frío en algunas personas, éste sería leve y fácilmente controlable mediante el aprovechamiento de ganancias internas apoyadas por la inercia térmica generada por la masa del edificio.

Dado que los límites de confort expresados en SET llevan implícita la condición de humedad, no se hace necesario fijar límites de confort higrico, como tampoco lo hace la norma 55 de ANSI/ASHRAE (2021).

Tabla 5.8 Información paramétrica de edificio hipotético para cálculo de estrategias de climatización en *bioclimarq*.

Parámetros	Szokolay (2008)	bioclimarq
Área total del edificio (at)	100 m ²	40 m ²
Área de ventanas frontales al sol (av)	20 m ²	8 m ²
Conductancia del edificio (qt)	115 W/K	117 W/K
Transmitancia U promedio de cerramientos (\bar{U}_i)	n. e.	0.56 W/m ² K ⁸²
Volumen del edificio ($V\theta$)	n. e.	100 m ³
Cambios de aire por hora (N)	n. e.	0.5 ⁸³

n. e. = no especificado⁸⁴

c. Para determinar los límites de las estrategias de climatización:

Como se mencionó en el apartado 5.1.2, la carta síntesis incluida en *bioclimarq* concilia los límites de aplicabilidad para las diferentes estrategias de climatización propuestas por los instrumentos de diagnóstico, y por lo tanto las recomendaciones de bioclimatiza-

82. Valor intermedio según la NOM-020-ENER-2011 (SENER, 2011)

83. Tasa de ventilación para una vivienda <47 m2 de acuerdo con la norma 62.2 de ASHRAE (2019).

84. Los datos no especificados por Szokolay (2008) pueden inferirse a través de las ecuaciones respectivas: $\bar{U}_i = 0.25 \text{ W/K}$; $V\theta = 300 \text{ m}^3$; $N = 0.4$ cambios de aire por hora.

ción que se derivan de ellos. Los criterios usados para la determinación de tales límites se explican a continuación:

Ganancia solar más inercia térmica (GS + IT)

bioclimarq retoma el procedimiento de cálculo propuesto por Szokolay (2008, pág. 59) pero ajustando los parámetros involucrados a fin de lograr condiciones más acordes a la realidad latinoamericana. El procedimiento se basa en un edificio hipotético con las características presentadas en la tabla 5.8.

Como se ve, en *bioclimarq* se ha decidido reducir el área total y el área de ventanas respecto de lo considerado por Szokolay. El razonamiento fue que, 40 m² corresponde al mínimo de superficie de una vivienda de bajo costo. De igual manera, se decidió incrementar la conductancia del edificio a partir del siguiente planteamiento:

$$qt = q_c + q_v \quad \text{Ec. 5.24}$$

donde:

- qt Conductancia total del edificio, en W/K
- q_c Flujo de calor en el edificio por conducción, en W/K
- q_v Flujo de calor en el edificio por ventilación, en W/K

A su vez:

$$q_c = \sum_i^n (a_i \times U_i) \quad \text{Ec. 5.25}$$

donde:

- a_i Área de cada cerramiento del edificio, en m²:
- U_i Coeficiente de transmitancia “U” de cada cerramiento del edificio, en W/K (véase el apartado 4.1.4 de este libro)

y

$$q_v = \frac{(1200 \times N \times V_o)}{3600} = 0.33 \times N \times V_o \quad \text{Ec. 5.26}$$

donde:

1200 Capacidad calorífica volumétrica del aire húmedo, en $J/m^3 K$

N Número de cambios de aire por hora

V_0 Volumen del edificio, en m^3

$N \times V_0$ Tasa de ventilación, en m^3/h

A partir de las precisiones anteriores, el cálculo para determinar el límite de aplicabilidad de la estrategia de ganancia solar ($T_{inf GS}$) se efectúa mediante la siguiente fórmula, basada en Szokolay (2008):

$$T_{inf GS} = T_{inf} - Q_g' f_{GS} \quad \text{Ec. 5.27}$$

donde:

$T_{inf GS}$ Límite térmico para ganancias solares, en $^{\circ}C$

T_{inf} Temperatura límite inferior de confort, en $^{\circ}C$ (SET)

Q_g' Radiación diaria global sobre plano horizontal del mes más frío, en W/m^2 día.

f_{GS} Factor de eficiencia estandarizado para ganancias solares, en $m^2 K/Wh$, que se obtiene así:

$$f_{GS} = \frac{(av \times \eta)}{(24 qt)} \quad \text{Ec. 5.28}$$

donde:

av Superficie del área de ventanas frontales al sol, en m^2

η Eficiencia del colector solar:

$\eta_{0.5}$ Eficiencia hasta del 50% = 0.5

$\eta_{0.7}$ Eficiencia hasta del 70% = 0.7

24 Horas día

qt Conductancia del edificio, en W/K

Cuando se aplican estas fórmulas con los valores adaptados de la tabla 5.8, se obtienen unos factores de eficiencia para ganancias solares f_{GS} de 0.0014 para $\eta_{0.5}$ y de 0.002 para $\eta_{0.7}$ (menos de

la mitad de lo considerado por Szokolay: 0.0036 y 0.005 respectivamente). Estos factores multiplicados por una $Q_g' = 5000 \text{ W/m}^2$ día (que podría considerarse como intermedia), arrojan un rango de aplicabilidad de 7 K para $\eta_{0.5}$ y de 10 K para $\eta_{0.7}$, valores que concuerdan con los rangos fijos usados en las cartas bioclimáticas de Olgyay, Givoni y Evans.

Esta estrategia se considera compuesta en virtud de que las necesidades de calentamiento suelen ocurrir en horas de la noche, cuando no hay disponibilidad de radiación solar. Así, para que la ganancia solar (GS) colectada durante el día pueda ser aprovechada en los periodos fríos, se hace necesaria la intervención de la inercia térmica generada por la masa del edificio ($GS + IT$) que la disipa en forma de calor.

Ventilación (V)

Para determinar el rango de utilidad de esta estrategia, *bioclimarq* se basa también en el procedimiento propuesto por Szokolay (2008, pág. 62), pero ajustando en este caso la eficiencia de ventilación aplicado a la velocidad del aire (v). Szokolay parte del supuesto que la ventana se encuentra a 45° del flujo de viento, orientación óptima para aprovechar ese potencial de ventilación, aplicándole un factor de eficiencia de 0.85. Esto quiere decir que la velocidad del aire promedio al interior del espacio ventilado puede ser hasta del 85% de la velocidad del aire al exterior. Sin embargo, Givoni (1969, pág. 264) basado en sus propios estudios de laboratorio (Givoni, 1965) establece que la máxima eficiencia que se puede lograr en esa orientación, sin ningún dispositivo o diseño especial de la ventana, es de 0.44 (44%).

Así, el cálculo para establecer el límite de utilidad de la estrategia de ventilación (T_{supv}) se realiza con la siguiente fórmula:

$$T_{supv} = T_{sup} + \Delta T_v \quad \text{Ec. 5.29}$$

donde:

- T_{supv} Límite térmico para ventilación, en °C (SET)
 T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en °C (SET)
 ΔT_v Rango de aplicabilidad de ventilación, en K:

$$\Delta T_v = (6 \times va \times \eta_v) - (1.6 \times [va \times \eta_v]^2) \quad \text{Ec. 5.30}$$

donde:

- va Velocidad del aire exterior m/s
 η_v Eficiencia de ventilación por orientación eólica
(45°) = 0.44

Para la carta síntesis de *bioclimarq* se consideró una velocidad del aire (va) de 1.5 m/s señalada por la norma ANSI/ASHRAE (2021) como la máxima confortable para edificios libremente ventilados. Al aplicar las fórmulas con tales datos se obtuvo un rango de utilidad ΔT_v de 3 K por arriba del T_{sup} . Ese margen concuerda con lo establecido en las cartas de Olgyay y Givoni. En el caso de los triángulos de confort de Evans, no se aclara cual es la va considerada, pero se estima que es de un m/s pues el margen establecido es de 2 K. Finalmente, el rango establecido en la carta ANSI/ASHRAE para edificios libremente ventilados es de 2.5 K para una va de 1.2 m/s, por lo que puede asumirse que se logra la conciliación.

Ventilación nocturna más inercia térmica (VN + IT)

Para definir el espacio de aplicabilidad de esta estrategia, *bioclimarq* se basa en el procedimiento relativo a la masa térmica propuesto por Szokolay (2008, págs. 59-62, 124) que toma la oscilación térmica promedio de la temporada (\overline{TS}_o) y le aplica un factor para determinar un amortiguamiento térmico estandarizado. Así, la fórmula para establecer el límite de utilidad de esta estrategia ($T_{sup\ vn}$) es:

$$T_{supvn} = T_{sup} + f_{am} (\overline{TS}_o) \quad \text{Ec. 5.31}$$

donde:

T_{supvn} Límite térmico de ventilación nocturna, en °C (SET)

T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en °C (SET)

f_{am} Factor de amortiguamiento térmico estándar, adimensional

\overline{TS}_o Oscilación térmica promedio, en K, que a su vez deriva de:

$$\overline{TS}_o = \overline{T_{max_o}} - \overline{T_{min_o}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

donde:

$\overline{T_{max_o}}$ Temperatura máxima exterior (promedio mensual o estacional), en °C

$\overline{T_{min_o}}$ Temperatura mínima exterior (promedio mensual o estacional), en °C

Szokolay estandariza el f_{am} en 0.3 mientras que Givoni (1969, págs. 288-289) fija el T_{supvn} en 33 °C, lo que podría equivaler a un f_{am} entre 0.3 y 0.6, para \overline{TS}_o entre 20 y 10 K. Como esta estrategia es útil para condiciones de calor seco, lo que lleva implícita una \overline{TS}_o amplia, *bioclimarq* establece el valor de f_{am} en 0.5.

Adicionalmente, se establece un límite higríco en la línea de 14 g/kg de razón de mezcla, pues la posibilidad de cielos despejados se reduce en la medida que la humedad ambiente se incrementa, acotación en la que coinciden Givoni y Szokolay.

Enfriamiento evaporativo (EE)

El límite de aplicabilidad de esta estrategia corresponde a la línea de 22 °C de temperatura de bulbo húmedo (T_w) señalada por Givoni (1969, pág. 287 y 289). Olgyay, que no usó un diagrama psicrométrico para la formulación de su carta bioclimática y por lo tanto no pudo apoyarse en valores de T_w , señala que por cada

0.5 g de agua que se aporte a una libra de aire seco (0.715 cm³ por kg)⁸⁵, se logra un efecto de enfriamiento de 3 °F, es decir 1.667 K (Olgyay V. , 2015, págs. 20-21). Ese gradiente determina la tasa de enfriamiento por evaporación (E_{avap}) = 2.33 cm³/K, que en términos de razón de mezcla equivale a 0.66 g/kg-K, la cual corresponde justamente a la línea de 22 °C de T_w para una presión atmosférica de 760 mm Hg (al nivel del mar).⁸⁶

Szokolay (2008, págs. 63-64, 124) por su parte, aunque coincide en establecer el límite de utilidad del enfriamiento evaporativo siguiendo el contorno de la T_w , no lo fija en 22 °C, sino que lo sujeta al límite máximo de su zona de confort que es variable. Sin embargo, este límite no es el único que plantea Szokolay, pues afirma que no es viable alcanzar un enfriamiento evaporativo directo más allá de 11 K por arriba de la temperatura neutra (es decir 8.5 K a partir del límite superior de confort T_{sup}). En esto coincide también Givoni (1969, pág. 287), pero lo fija en 34 °C, lo que equivale a aproximadamente 9 K por encima de su T_{sup} . En cuanto al enfriamiento evaporativo indirecto Szokolay lo limita hasta 11.5 K y Givoni hasta 41 °C que equivale a 15 K por encima del T_{sup} .

De igual manera, tanto Szokolay (2008) como Givoni (1998) reconocen que no tiene utilidad el uso del enfriamiento evaporativo en condiciones con una razón de mezcla superior a los 17 g/kg.

Evans no considera esta estrategia.

Con base en los anteriores planteamientos, *bioclimarq* establece los límites de aplicabilidad para el enfriamiento evaporativo de acuerdo con los criterios de la tabla 5.9.

85. La conversión aparece en la edición española del libro de Olgyay (1998, pág. 21)

86. Aproximadamente 1008.4 hPa

Tabla 5.9 Límites de aplicabilidad para las estrategias de enfriamiento evaporativo (EE) en *bioclimarq*.

Estrategias	Límites		
	Térmico ($T_{sup EE}$)	Adiabático ($T_w sup EE$)	Hígrico ($r_w sup EE$)
Enfriamiento evaporativo directo (EED)	$T_{sup EED} = T_{sup} + 8.5 K$	22 °C (T_w)	17 g/kg (r_w)
Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)	$T_{sup EEI} = T_{sup} + 11.5 K$		

donde:

$T_{sup EED}$ = Límite térmico para enfriamiento evaporativo directo, en °C

$T_{sup EEI}$ = Límite térmico para enfriamiento evaporativo indirecto, en °C

T_{sup} = Temperatura límite superior de confort, en °C (SET)

$T_w sup EE$ = Límite adiabático para enfriamiento evaporativo, en °C (temperatura de bulbo húmedo, T_w)

$r_w sup EE$ = Límite higrico para enfriamiento evaporativo indirecto, en g/kg (razón de mezcla, r_w)

5. 3 Guía del usuario

El programa *bioclimarq* es un libro de Excel que se utiliza como herramienta de apoyo para la toma de decisiones de adecuación bioclimática en el diseño urbano-arquitectónico, en su etapa de anteproyecto.

5.3.1 Instrucciones de inicio

A fin de trabajar con *bioclimarq* es necesario que:

- a. Esté habilitada la edición del documento. Para ello haga clic en el mensaje *habilitar edición*, que aparecerá en una franja amarilla en la parte superior de la pantalla al momento de iniciar. De no hacerlo, el archivo será de sólo lectura y no se podrá interactuar con él.
2. Los separadores numéricos sean con coma para separar miles y punto para separar decimales. De no hacerlo, al-

gunas operaciones no podrán realizarse correctamente y aparecerán mensajes de error. En el caso de que su configuración habitual no sea la recomendada, haga clic en *Archivo* (esquina superior izquierda) y aparecerá un menú en donde debe seleccionar *Opciones* (en el extremo inferior del menú). Se abrirá entonces un cuadro (figura 5.3) del cual debe seleccionar la pestaña *Avanzadas*, y a su vez en *Opciones de edición*, desactive la casilla *Usar separadores del sistema* e introduzca manualmente los separadores recomendados.

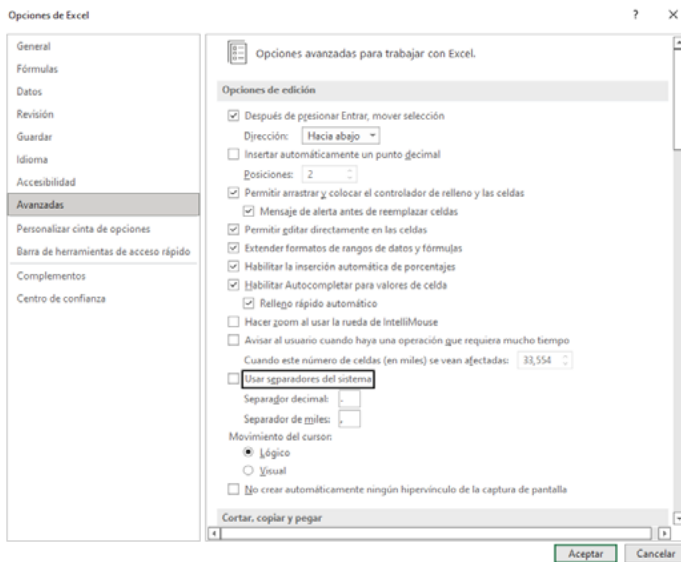


Figura 5.3 Cuadro de opciones de Excel para configurar separadores numéricos.

- c. La resolución de pantalla recomendada para un mejor trabajo visual es de 1920 x1080. De trabajar con una resolución menor, se corre el riesgo de que algunos de los contenidos de las celdas aparezcan incompletos o se traslapen impidiendo su visualización.
- d. El acercamiento de pantalla debe ser 80% como mínimo. El acercamiento se ajusta mediante el operador deslizable

en la parte inferior derecha de la pantalla, o en la pestaña superior *Vista*, donde se podrá seleccionar la opción *Zoom*. De operar con acercamientos menores, el contenido de algunas celdas podrá aparecer como ilegible.

5.3.2 Estructura

bioclimarq se compone de treinta y siete hojas de cálculo dispuestas en tres categorías según la interacción con el usuario y organizadas en tres bloques temáticos (tabla 5.10):

Tabla 5.10. Estructura de *bioclimarq*

Categorías de interacción				
Amplia	Limitada			Restringida
	Bloques temáticos			
<i>Home</i> (hoja de inicio)	<i>Caracterización climática</i> (5 hojas)	<i>Diagnóstico bioclimático</i> (7 hojas)	<i>Recomendaciones de climatización</i> (3 hojas)	Cálculos matemáticos y operaciones lógicas (21 hojas ocultas)

La hoja de inicio, denominada *Home*, cumple una triple función: proveer de información básica sobre el programa; registrar los datos geográficos, climáticos y de adaptación del sitio; y servir de articulador con el resto de las hojas del programa. Es la única hoja donde el usuario puede introducir datos.

Las quince hojas correspondientes a la categoría de interacción limitada muestran los resultados de los análisis, diagnósticos y recomendaciones del programa. A su vez, se organizan en tres bloques temáticos:

1. Caracterización climática, compuesto por cinco hojas denominadas:
 - a. Tabla de temperaturas y humedades horarias (*Med Hor*),
 - b. Resumen de temperaturas (*Res Temp*),
 - c. Resumen de humedades (*Res Hum*),
 - d. Resumen de radiación solar (*Res Rad*), y
 - e. Resumen del clima (*Res Clima*)
2. Diagnóstico bioclimático, compuesta por siete hojas denominadas:

- a. Carta de confort ASHRAE 55: 2020 PMV y PPD (*ASHRAE PMV*),
 - b. Carta de confort ASHRAE 55: 2020 Adaptativo (*ASHRAE adap*),
 - c. Carta bioclimática de Olgyay (*Olgyay*),
 - d. Carta bioclimática para edificios (BBCC) de Givoni (*Givoni*),
 - e. Carta bioclimática de Szokolay (*Szokolay*),
 - f. Triángulos de Confort de Evans (*Evans*), y
 - g. Resumen del Diagnóstico Bioclimático (*Res Diag Biocl*)
3. Recomendaciones de climatización, compuesto por tres hojas de cálculo denominadas:
- a. Tablas de Mahoney (*Mahoney*)
 - b. Coeficientes de Serra y Coch (*Serra&Coch*)
 - c. Resumen de recomendaciones de climatización (*Res Rec Biocl*)

En esta categoría la interacción con el usuario se reduce, puesto que sólo en algunas de ellas —las que corresponden a los instrumentos de diagnóstico bioclimático— el usuario puede escoger entre diversas opciones de resultados: anuales o estacionales; con o sin considerar el efecto de isla de calor urbana (ICU); y según los escenarios de cambio climático (actual, hacia 2050 o hacia fines del siglo).

Finalmente, en las veintiún hojas ocultas cuya función es la realización de cálculos matemáticos y operaciones lógicas necesarias para configurar los resultados desplegados en las hojas visibles, el usuario no debe tener interacción alguna, pues la sobreescritura de su contenido podría generar errores fatales que impedirían la ejecución correcta de los algoritmos programados, y por ende, de los resultados desplegados. Sin embargo el conjunto de ecuaciones sustantivas utilizadas para ello, se muestran en el apéndice 4 de este libro.

5.3.3 Instrucciones operativas

Hoja de inicio (figura 5.4)

1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

- 1.1 Tabla de temperatura y humedad horarias
- 1.2 Presiones de temperatura
- 1.3 Presiones de humedad
- 1.4 Presiones de radiación solar
- 1.5 Presiones de viento
- 1.6 Presiones de lluvia

2. RECOMENDACIONES DE CLIMATIZACIÓN

- 2.1 Carta de confort ASHRAE 55: 2010 (PMV y PPD)
- 2.2 Carta de confort ASHRAE 55: 2010 (Radiación)
- 2.3 Carta de confort de Otago
- 2.4 Carta de confort de ASHRAE 55: 2010 (PMV) en interiores
- 2.5 Carta de confort de ASHRAE 55: 2010 (PMV) en exteriores
- 2.6 Tabla de confort de ASHRAE 55: 2010 (PMV) en interiores
- 2.7 Presiones de ASHRAE 55: 2010 (PMV) en interiores
- 2.8 Presiones de ASHRAE 55: 2010 (PMV) en exteriores

3. DATOS (Escriba solo en las celdas sombreadas)

Condicionante	Unidad	Valor
Nombre del lugar	Quetzaltenango, Guatemala, México	
Latitud	16° 00' 00" N	98° 00' 00" W
Longitud	-105° 00' 00" W	-105° 00' 00" W
Zona horaria (UTC)	hora local	-06:00
Altitud	m	1000
Presión de la ciudad	hPa	1013.25

4. PROCESO

```

    graph TD
      A[Inicio] --> B{¿Hay mejor identificación de los datos?}
      B -- Sí --> C[Procesamiento y recomendaciones de climatización]
      B -- No --> A
      C --> D{¿Hay recomendación de climatización?}
      D -- Sí --> E[Procesamiento de datos climáticos]
      D -- No --> C
      E --> F{¿Hay recomendación de climatización?}
      F -- Sí --> G[Procesamiento de datos climáticos]
      F -- No --> E
      G --> H{¿Hay recomendación de climatización?}
      H -- Sí --> I[Procesamiento de datos climáticos]
      H -- No --> G
      I --> J{¿Hay recomendación de climatización?}
      J -- Sí --> K[Procesamiento de datos climáticos]
      J -- No --> I
      K --> L{¿Hay recomendación de climatización?}
      L -- Sí --> M[Procesamiento de datos climáticos]
      L -- No --> K
      M --> N{¿Hay recomendación de climatización?}
      N -- Sí --> O[Procesamiento de datos climáticos]
      N -- No --> M
      O --> P{¿Hay recomendación de climatización?}
      P -- Sí --> Q[Procesamiento de datos climáticos]
      P -- No --> O
      Q --> R{¿Hay recomendación de climatización?}
      R -- Sí --> S[Procesamiento de datos climáticos]
      R -- No --> Q
      S --> T{¿Hay recomendación de climatización?}
      T -- Sí --> U[Procesamiento de datos climáticos]
      T -- No --> S
      U --> V{¿Hay recomendación de climatización?}
      V -- Sí --> W[Procesamiento de datos climáticos]
      V -- No --> U
      W --> X{¿Hay recomendación de climatización?}
      X -- Sí --> Y[Procesamiento de datos climáticos]
      X -- No --> W
      Y --> Z{¿Hay recomendación de climatización?}
      Z -- Sí --> AA[Procesamiento de datos climáticos]
      Z -- No --> Y
      AA --> AB{¿Hay recomendación de climatización?}
      AB -- Sí --> AC[Procesamiento de datos climáticos]
      AB -- No --> AA
      AC --> AD{¿Hay recomendación de climatización?}
      AD -- Sí --> AE[Procesamiento de datos climáticos]
      AD -- No --> AC
      AE --> AF{¿Hay recomendación de climatización?}
      AF -- Sí --> AG[Procesamiento de datos climáticos]
      AF -- No --> AE
      AG --> AH{¿Hay recomendación de climatización?}
      AH -- Sí --> AI[Procesamiento de datos climáticos]
      AH -- No --> AG
      AI --> AJ{¿Hay recomendación de climatización?}
      AJ -- Sí --> AK[Procesamiento de datos climáticos]
      AJ -- No --> AI
      AK --> AL{¿Hay recomendación de climatización?}
      AL -- Sí --> AM[Procesamiento de datos climáticos]
      AL -- No --> AK
      AM --> AN{¿Hay recomendación de climatización?}
      AN -- Sí --> AO[Procesamiento de datos climáticos]
      AN -- No --> AM
      AO --> AP{¿Hay recomendación de climatización?}
      AP -- Sí --> AQ[Procesamiento de datos climáticos]
      AP -- No --> AO
      AQ --> AR{¿Hay recomendación de climatización?}
      AR -- Sí --> AS[Procesamiento de datos climáticos]
      AR -- No --> AQ
      AS --> AT{¿Hay recomendación de climatización?}
      AT -- Sí --> AU[Procesamiento de datos climáticos]
      AT -- No --> AS
      AU --> AV{¿Hay recomendación de climatización?}
      AV -- Sí --> AW[Procesamiento de datos climáticos]
      AV -- No --> AU
      AW --> AX{¿Hay recomendación de climatización?}
      AX -- Sí --> AY[Procesamiento de datos climáticos]
      AX -- No --> AW
      AY --> AZ{¿Hay recomendación de climatización?}
      AZ -- Sí --> BA[Procesamiento de datos climáticos]
      AZ -- No --> AY
      BA --> BB{¿Hay recomendación de climatización?}
      BB -- Sí --> BC[Procesamiento de datos climáticos]
      BB -- No --> BA
      BC --> BD{¿Hay recomendación de climatización?}
      BD -- Sí --> BE[Procesamiento de datos climáticos]
      BD -- No --> BC
      BE --> BF{¿Hay recomendación de climatización?}
      BF -- Sí --> BG[Procesamiento de datos climáticos]
      BF -- No --> BE
      BG --> BH{¿Hay recomendación de climatización?}
      BH -- Sí --> BI[Procesamiento de datos climáticos]
      BH -- No --> BG
      BI --> BJ{¿Hay recomendación de climatización?}
      BJ -- Sí --> BK[Procesamiento de datos climáticos]
      BJ -- No --> BI
      BK --> BL{¿Hay recomendación de climatización?}
      BL -- Sí --> BM[Procesamiento de datos climáticos]
      BL -- No --> BK
      BM --> BN{¿Hay recomendación de climatización?}
      BN -- Sí --> BO[Procesamiento de datos climáticos]
      BN -- No --> BM
      BO --> BO[Procesamiento de datos climáticos]
  
```

Figura 5.4. Hoja de inicio

La hoja de inicio, denominada *Home*, se divide en cuatro secciones, dos informativas y dos operativas.

La primera sección informativa se localiza en el margen izquierdo, y se reconoce por su fondo oscuro. Contiene la identificación de *bioclimark*, los datos del desarrollador así como las referencias bibliográficas que dan soporte teórico a los procesos de cálculo y análisis del programa.

La segunda sección informativa denominada *Proceso* se ubica a la derecha de la hoja, señalada con fondo beige. Se compone de dos apartados: el primero contiene una síntesis ejecutiva del

Método para el Diseño Bioclimático (tabla 4.1) que rige la operatividad del programa (explicado en el apartado 4.1.2 de este libro); y la segunda consiste en el *Diagrama de flujo* a seguir para el desarrollo de un proyecto bioclimático conforme a la metodología planteada (corresponde a la figura 4.1 de este libro). Se advierte que debido a que las acciones correspondientes a las fases 4 y 5 del método (señaladas con fondo un poco más oscuro) deben realizarse una vez concluida la etapa de prediseño, no están incluidas en *bioclimarq*, por lo que para satisfacerlas deberá acudir a otro tipo de software —de simulación térmica, eólica o de sistemas de certificación sostenible, por ejemplo—.

Respecto de las secciones operativas, identificadas ambas por estar sobre fondo blanco al centro de la hoja, una es de carácter recopilador y la otra es de carácter articulador.

La sección ubicada al centro de la hoja, denominada *Datos*, tiene como objetivo principal el acopio de información, y constituye el núcleo más importante de la interacción entre el usuario y el programa, pues es ahí donde se introduce toda la información necesaria para generar los resultados. La sección se subdivide en tres apartados relativos a datos geográficos (denominado *Localización*), datos climáticos (llamado *Normales Climatológicas*) y datos de adaptación (designado *Hábitos en la Localidad*).

La información solicitada en cada uno de estos apartados, deberá introducirla el usuario sólo en las celdas destinadas para ello, indicadas con fondo gris. Se debe tener especial cuidado que los datos sean introducidos en las unidades especificadas para cada entrada, pues de lo contrario generaría errores de interpretación de los resultados. Así mismo debe procurarse que la información introducida provenga de fuentes confiables y de preferencia esté verificada. En el caso de datos climáticos se recomienda que correspondan a información normalizada, correspondiente a varios años de registro (véase el apartado 5.1.1).

Los datos de *localización* geográfica solicitados (figura 5.5) son:

1. *Nombre del lugar*.
2. *Latitud* en grados, minutos y segundos. Las latitudes localizadas en el hemisferio Norte deben escribirse con signo positivo y las localizadas en el hemisferio Sur con signo negativo. Una vez introducidos los datos, el programa los convierte en formato decimal (extremo derecho del renglón).
3. *Longitud* en grados, minutos y segundos. Las longitudes localizadas al Este del meridiano de Greenwich deben escribirse con signo positivo y las localizadas al Oeste con signo negativo. Una vez introducidos los datos, el programa los convierte en formato decimal (extremo derecho del renglón).
4. *Zona horaria* (UTC) en horas de diferencia respecto del meridiano de Greenwich. Una vez introducido el dato, el programa lo convierte a longitud del meridiano que rige el huso horario local en formato de grados y decimales (extremo derecho del renglón).
5. *Altitud* o elevación en metros sobre el nivel medio del mar (msnm).
6. *Población de la ciudad* en número de habitantes. Esta información es relevante para calcular el efecto de isla de calor urbana (ICU).
7. *Ubicación del lote en la ciudad* mediante la selección de una de las tres opciones contempladas:
 - En el centro de la ciudad;
 - Entre el centro y la periferia; o bien
 - En la periferia o localidad rururbana.

La selección se hace haciendo clic en el botón de opción correspondiente, en el entendido que sólo se permite una opción. Igual que la entrada anterior, esta información

sirve para estimar la intensidad del efecto de isla de calor urbano (ICU).

8. *Uso de horario de verano* mediante la selección de los meses en que se practica el horario de verano. Igualmente la selección se hace mediante un clic en el cuadro de opción correspondiente a cada mes. En caso de que no se practique el horario de verano en el lugar, todas las casillas deberán permanecer en blanco.

Localización	
Nombre del lugar	Guadalejara Jalisco, México
Latitud	20 ° 40 ' 35 " 20.7 °
Longitud	-103 ° 20 ' 43 " -103.3 °
Zona horaria (UTC)	-8 Huso horario -90.0 °
Altitud	1550 msnm
Población de la ciudad	1,460,000 habitantes

Ubicación del lote en la ciudad	Uso de horario de verano											
	Meses con horario de verano											
En el centro de la ciudad <input checked="" type="radio"/>	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Entre el centro y la periferia <input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
En la periferia o localidad rurbana <input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 5.5. Datos de localización geográfica solicitados en la hoja *Home*

Los datos climáticos solicitados en el apartado *Normales climatológicas* (figura 5.6) integran dos grupos en función de su obligatoriedad: los que deben ser introducidos forzosamente y los que pueden dejarse vacíos en caso de no contar con ellos. Los datos climáticos que forman este segundo grupo están marcados con un asterisco (*). *bioclimarq* subsana la carencia de tal información mediante estimaciones teóricas realizadas con las ecuaciones referidas en el apartado 5.2.1 de este libro. Sin embargo, se insiste en procurar introducir información registrada en campo, de fuentes confiables y normalizada según las normas de la WMO o cuando menos proveniente de cuando menos los últimos 10 años. *bioclimarq* privilegia los datos introducidos a los calculados.

La información climática proveniente de estimaciones por computadora en formatos como epw, TMY o similares, puede ser considerada sólo como último recurso, especialmente si se desconoce la confiabilidad de la fuente, pues podría haber sido

generada con datos de sólo un año o con algún tipo de sesgo no deseado. El uso de datos climáticos estimados —no medidos en campo— puede generar distorsiones en los resultados arrojados por *bioclimarq*. Cuando eso ocurra se sugiere sustituir tales datos por los registrados en un centro meteorológico confiable, lo más cercano posible al lugar del proyecto, y que comparta con éste el mayor número de rasgos posibles del tipo de clima.

Los datos climáticos de introducción obligatoria son:

1. *Temperatura máxima promedio* de cada mes, en °C.
2. *Temperatura mínima promedio* de cada mes, en °C.
3. *Precipitación pluvial total* de cada mes, en mm.
4. *Velocidad media de viento* de cada mes, en m/s.

Los datos climáticos que se pueden obviar, marcados con asterisco (*), son:

1. *Humedad relativa máxima promedio* de cada mes, en %.
2. *Humedad relativa mínima promedio* de cada mes, en %.
3. *Humedad relativa media* de cada mes, en %.
4. *Radiación media sobre plano horizontal* de cada mes, en W/hm².
5. *Brillo solar efectivo* de cada mes, en horas-mes. En caso de contar con datos de este parámetro, debe asegurarse que la unidad considerada es horas con sol al mes, ya que algunos organismos lo reportan en horas con sol al día. De ser este el caso, basta con multiplicar el dato proporcionado por el número de días del mes correspondiente.

Normales Climatológicas	Meses												Anual	Unidad
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Temperatura máxima promedio	24.1	26.1	28.4	30.7	31.9	30.0	27.1	27.0	26.7	26.7	26.0	24.4	27.4	°C
Temperatura mínima promedio	10.4	11.5	13.1	15.6	17.4	17.5	16.6	16.6	16.7	15.4	12.8	11.1	14.6	°C
Humedad relativa máxima promedio*	83.7	82.6	82.7	87	90.2	92.6	95.3	95	95.7	92.5	86	83.9	88.9	%
Humedad relativa mínima promedio*	40.3	38.7	38.2	40.7	43.7	49.1	54.3	54.6	56	50.6	43	41.6	45.9	%
Humedad relativa media*	62.0	60.7	60.5	63.9	67.0	70.8	74.8	74.8	75.8	71.6	65.5	62.8	67.5	%
Precipitación pluvial total	17.4	8.0	3.7	4.0	22.9	193.6	272.2	211.3	176.0	57.3	11.5	6.0	984	mm
Radiación media s/p. horizontal*														W/m ² día
Brillo solar efectivo*														horas-mes
Velocidad media de viento	1.7	2.2	2.8	3.0	3.0	2.5	1.8	1.7	1.8	1.6	1.5	1.5	2.1	m/s

* Si no cuenta con los datos marcados con asterisco *, deje vacías las celdas correspondientes.

Figura 5.6. Datos climáticos *normales* solicitados en la hoja *Home*

La información solicitada en el apartado *Hábitos en la localidad* (figura 5.7) abarca tres ámbitos de adaptación de los habitantes con respecto al clima local: vestimenta, prácticas de ventilación y uso de climatización artificial. Esta información es necesaria para la realización del diagnóstico de confort térmico con enfoque predictivo, es decir, para calcular los indicadores de PMV y PPD.






Hábitos en la localidad	Meses																																																																																									
	Ena	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic																																																																														
Tipo de ropa habitual	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>A: Muy ligera</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B: Ligera</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>C: Moderada</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>D: Abrigada</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>E: Muy abrigada</p> </div> </div> <p style="font-size: small; text-align: center;">Fuente de la imagen: Gut et Ackernecht (1993) / Valores del coeficiente de arropamiento: ANSI-ASHRAE 55: 2010</p>																																																																																									
Uso de la ventilación natural	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th><th>Ena</th><th>Feb</th><th>Mar</th><th>Abr</th><th>May</th><th>Jun</th><th>Jul</th><th>Ago</th><th>Sep</th><th>Oct</th><th>Nov</th><th>Dic</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Las ventanas por lo regular están abiertas</td> <td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td></tr> <tr> <td>Las ventanas se abren a ciertos horarios</td> <td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td></tr> <tr> <td>Las ventanas por lo regular están cerradas</td> <td><input checked="" type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td><td><input type="radio"/></td></tr> </tbody> </table>													Ena	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Las ventanas por lo regular están abiertas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Las ventanas se abren a ciertos horarios	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Las ventanas por lo regular están cerradas	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																										
	Ena	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic																																																																														
Las ventanas por lo regular están abiertas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																														
Las ventanas se abren a ciertos horarios	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																														
Las ventanas por lo regular están cerradas	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																														
Uso de climatización artificial	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tbody> <tr> <td>Los edificios climatizados artificialmente son comunes</td> <td colspan="11">No suelen registrarse condiciones calurosas en el año</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="11">Se registran condiciones calurosas ocasionalmente</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Algunos edificios cuentan con clima artificial</td> <td colspan="11">Se registran condiciones calurosas ocasionalmente</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="11">Se registran condiciones calurosas durante una temporada completa</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Muy pocos edificios cuentan con clima artificial</td> <td colspan="11">Las condiciones calurosas ocurren durante una temporada completa</td> <td><input checked="" type="radio"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="11">Las condiciones calurosas ocurren prácticamente todo el año</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </tbody> </table>												Los edificios climatizados artificialmente son comunes	No suelen registrarse condiciones calurosas en el año											<input type="radio"/>		Se registran condiciones calurosas ocasionalmente											<input type="radio"/>	Algunos edificios cuentan con clima artificial	Se registran condiciones calurosas ocasionalmente											<input type="radio"/>		Se registran condiciones calurosas durante una temporada completa											<input type="radio"/>	Muy pocos edificios cuentan con clima artificial	Las condiciones calurosas ocurren durante una temporada completa											<input checked="" type="radio"/>		Las condiciones calurosas ocurren prácticamente todo el año											<input type="radio"/>
Los edificios climatizados artificialmente son comunes	No suelen registrarse condiciones calurosas en el año											<input type="radio"/>																																																																														
	Se registran condiciones calurosas ocasionalmente											<input type="radio"/>																																																																														
Algunos edificios cuentan con clima artificial	Se registran condiciones calurosas ocasionalmente											<input type="radio"/>																																																																														
	Se registran condiciones calurosas durante una temporada completa											<input type="radio"/>																																																																														
Muy pocos edificios cuentan con clima artificial	Las condiciones calurosas ocurren durante una temporada completa											<input checked="" type="radio"/>																																																																														
	Las condiciones calurosas ocurren prácticamente todo el año											<input type="radio"/>																																																																														

Figura 5.7. Información de los hábitos de adaptación solicitada en la hoja *Home*

En el segmento *Tipo de ropa habitual*, el usuario debe elegir una de las cuatro opciones disponibles para cada mes, a saber:

- A. Muy ligera;
- B. Ligera;
- C. Moderada;
- D. Abrigada; o
- E. Muy abrigada.

Para ello debe dar clic en la flecha localizada a la derecha del operador que está debajo del cuadro con el nombre abreviado de cada mes. Al hacerlo se desplegará la lista de opciones a seleccionar (figura 5.8). Como apoyo a la toma de decisión de este

segmento se incluye una viñeta con dibujos que muestran vestimentas “tipo” que podrían corresponder a cada una de las cuatro alternativas (figura 5.7).

Ene	Feb
d	c
<input type="button" value="A"/> <input type="button" value="B"/> <input type="button" value="C"/> <input type="button" value="D"/> <input type="button" value="E"/>	

Figura 5.8. Operador con lista de opciones de vestimenta a elegir en la hoja *Home*

En el segmento *Uso de ventilación natural*, el usuario debe indicar la rutina que más se ajusta a la cotidianidad en el lugar, por cada mes:

- Las ventanas por lo regular están abiertas;
- Las ventanas se abren a ciertos horarios; o
- Las ventanas por lo regular están cerradas.

Para ello, el usuario debe hacer clic en el botón de opción correspondiente, en el entendido que sólo se permite una opción por mes (figura 5.7).

En cuanto al segmento *Uso de climatización artificial*, el usuario debe escoger la situación más común en el lugar del proyecto, respecto del grado de habituación de equipos de climatización artificial (ya sea para enfriamiento o calefacción), en función del régimen térmico anual que mejor se ajusta a las condiciones del clima local. La combinación de ambos factores da lugar a seis opciones a elegir (tabla 5.11).

Para el llenado de este segmento, se recomienda definir primero el grado de habituación de climatización artificial (columna izquierda) y luego una de las dos opciones de las condiciones del régimen térmico anual en el lugar (columna derecha). La selección se ejecuta haciendo clic en el botón de opción correspondiente

(en el extremo derecho de la fila), en el entendido que sólo se puede elegir una de las seis opciones posibles (figura 5.7). El objetivo de este segmento es proveer de información al sistema a fin de ajustar las fórmulas de PMV y PPD, especialmente para poblaciones con poca habituación a la climatización artificial.

Tabla 5.11. Opciones para determinar el uso de climatización artificial en la hoja *Home*.

<i>Grado de habituación a equipos de clima artificial</i>	<i>Régimen térmico anual</i>
Los edificios climatizados artificialmente son comunes	No suelen registrarse condiciones calurosas en el año
	Se registran condiciones calurosas ocasionalmente
Algunos edificios cuentan con clima artificial	Se registran condiciones calurosas ocasionalmente
	Se registran condiciones calurosas durante una temporada completa
Muy pocos edificios cuentan con clima artificial	Las condiciones calurosas no ocurren durante todo el año
	Las condiciones calurosas ocurren prácticamente todo el año

Finalmente, la sección operativa localizada en la parte central superior de la hoja *Home*, puede considerarse como un *índice* o *menú* que muestra el contenido de cada uno de los bloques temáticos que conforman *bioclimarq* (figura 5.9).

1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	<ul style="list-style-type: none"> 1.1 Tabla de temperaturas y humedades horarias 1.2 Resumen de temperatura 1.3 Resumen de humedades 1.4 Resumen de radiación solar <u>1.5 Resumen del clima</u>
2. DIAGNÓSTICO BIOCLIMÁTICO	<ul style="list-style-type: none"> 2.1 Carta de confort ASHRAE 55: 2020 (PMV y PPD) 2.2 Carta de confort ASHRAE 55: 2020 (Adaptativo) 2.3 Carta bioclimática de Olgyay 2.4 Carta bioclimática para edificios (BBCC) de Givoni 2.5 Carta bioclimática de Szokolay 2.6 Triángulos de Confort de Evans <u>2.7 Resumen de diagnóstico bioclimático</u>
3. RECOMENDACIONES DE CLIMATIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> 3.1 Tablas de Mahoney 3.2 Coeficientes de Serra y Coch <u>3.3 Resumen de recomendaciones de climatización</u>

Figura 5.9. Índice o menú articulador del contenido de *bioclimarq* en la hoja *Home*

Esta sección tiene también la función de articular las diferentes hojas que integran *bioclimarq* con la hoja de inicio. Lo anterior quiere decir que el usuario puede ir de la hoja *Home* al contenido deseado de cualquiera de los bloques temáticos, con sólo colocar el cursor sobre el título correspondiente —el ícono del cursor se transformará— y hacer clic con el botón derecho del *ratón*.

Otra forma de pasar de la hoja de inicio a cualquiera otra de los bloques temáticos es mediante las pestañas colocadas en la parte inferior de la pantalla. A diferencia del índice articulador, los nombres de las pestañas no presentan el título completo del contenido sino sus abreviaturas (las cuales se muestran en el punto 5.3.2 de este capítulo).

5.3.4 Instrucciones para la interpretación de resultados

Como se mencionó antes, el contenido correspondiente a los tres bloques temáticos de *bioclimarq* reducen la posibilidad de interacción con el usuario dado que su objetivo es el de proveer los resultados de los cálculos, análisis y diagnósticos realizados. En ese sentido, sólo el segundo bloque, correspondiente al *diagnóstico bioclimático*, permite cierta intervención para que el usuario escoja escenarios alternativos del diagnóstico. Los otros dos bloques, *caracterización climática* y *recomendaciones de climatización* son sólo demostrativos.

Los tres bloques guardan la misma estructura consistente en dos secciones. La primera de carácter particular, donde cada hoja muestra los resultados de una variable climática, de una herramienta de diagnóstico o de un método de decodificación particular. La segunda de carácter conclusivo, en que la última hoja de cada bloque presenta el resumen ejecutivo del contenido de las hojas que le preceden. De esta manera, el usuario puede dirigirse directamente a la hoja de resumen y obtener la información decantada que puede serle útil para la toma de decisiones de pro-

yecto, o también revisar algún aspecto en particular —o todos los que componen el bloque—, a fin de tener un panorama más amplio de la cuestión.

En seguida se plantean algunas pautas para hacer una interpretación lo más atinada, productiva y fidedigna posible de los contenidos anidados en cada bloque temático.

Bloque 1: Caracterización climática

Este bloque asume la tarea de organizar, jerarquizar, y sistematizar la información climática introducida por el usuario, así como la estimada por el propio programa. Su enfoque teórico evita hacer una clasificación de climas, que conlleva el riesgo de “etiquetar” el clima de cada lugar y con ello propiciar sesgos o malentendidos. Por el contrario, los algoritmos de *bioclimarq* (explicados en el apartado 5.1.1) identifican los rasgos que caracterizan el comportamiento *normal* de los elementos del clima que afectan la sensación térmica de las personas a lo largo del año. Así, el resultado del bloque no es la definición del *tipo* de clima, sino la identificación de sus características relevantes.

La sección particular del bloque se compone de cuatro hojas que comparten una estructura similar. En la esquina superior izquierda de la hoja se encuentra siempre la identificación de *bioclimarq*, los datos del desarrollador, las referencias bibliográficas que dan soporte teórico a los procesos de cálculo y análisis que intervienen en ella y los datos de localización geográfica del lugar bajo análisis: nombre, latitud, longitud y altitud.

En el caso de la primera hoja del bloque (1.1), denominada *Tabla de temperaturas y humedades horarias* (figura 5.1), el contenido específico se despliega abajo del área de identificación. Consiste en el concentrado tabular de los valores de temperatura y humedad calculados para cada hora de un *día típico* de cada mes. En las abscisas se despliegan los doce meses del año y en las ordenadas

las veinticuatro horas del día. Los valores horarios de temperatura y humedad insertados en la tabla corresponden a la hora civil.

BIOCIMARIO

bioclimary 2022

Hoja de cálculo desarrollada por Gómez-Argentea, G.
 Humedad relativa estimada con el modelo de Tejeda Martínez, A. (1994)
 Procedimiento de cálculo de medias horarias desarrollado por Tejeda, A. (1999)

Tabla de temperaturas y humedades horarias

Localización

LUGAR	Guadalupe Jalisco, México
LATITUD	20.7 Norte
LONGITUD	-103.3 Oeste
ALTITUD	1550 metros

HORA	TEMPERATURA °C												HUMEDAD RELATIVA %												RAZÓN DE MEZCLA g agua / Kg aire seco														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC			
0	12.6	14.3	16.0	17.9	19.6	18.4	16.2	14.2	12.2	10.2	10.1	9.9	9.2	71.2	72.2	72.2	74.1	81.0	82.2	87.4	87.3	88.1	84.8	72.6	71.7	8.4	8.8	9.9	12.0	13.8	14.2	12.6	12.6	12.7	12.5	12.7	12.5	10.0	8.8
1	12.0	12.8	13.5	14.5	15.2	16.0	17.0	17.9	17.9	16.8	15.3	13.6	72.5	74.2	74.2	78.0	83.0	85.9	89.0	88.0	88.0	86.0	76.9	72.9	8.7	8.7	9.7	11.8	12.8	14.1	12.5	12.5	12.7	12.2	12.9	12.7			
2	12.5	13.3	14.0	15.1	15.8	16.7	17.6	17.6	17.7	16.5	14.8	13.2	75.4	75.8	75.8	81.3	84.4	87.2	90.2	90.0	90.8	87.3	77.8	75.8	8.2	8.2	8.6	11.7	12.6	14.0	12.5	12.4	12.6	12.1	12.8	12.6			
3	12.1	12.8	13.6	14.3	15.1	16.1	17.1	17.1	17.2	16.0	14.4	12.7	77.0	77.2	77.2	82.4	85.6	88.3	91.3	91.0	91.8	88.4	79.4	77.4	8.1	8.2	8.5	11.5	12.4	13.8	12.3	12.3	12.5	12.0	12.7	12.5			
4	11.8	12.2	13.0	13.6	14.4	15.2	16.0	16.6	16.6	15.4	14.1	12.4	78.3	78.3	78.3	84.7	87.9	90.5	93.3	93.0	93.7	90.4	80.7	78.7	8.1	8.4	8.3	11.3	12.1	13.6	12.2	12.1	12.3	11.8	12.6	12.4			
5	11.1	11.5	12.1	12.6	13.4	14.1	14.8	15.2	15.2	14.0	12.5	11.8	79.4	80.4	80.5	87.0	90.2	92.6	95.3	95.0	95.7	92.5	81.9	79.7	8.0	8.3	8.1	11.6	12.5	13.9	12.4	12.3	12.5	12.1	12.8	12.6			
6	10.4	10.8	11.1	11.6	12.1	12.8	13.3	13.3	13.3	12.4	11.0	10.1	81.6	82.6	82.7	88.8	87.0	89.6	92.5	92.2	93.0	89.6	82.9	81.8	7.8	8.0	8.4	12.4	13.4	14.6	12.9	12.9	13.0	12.6	13.3	13.2			
7	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	82.7	79.6	79.7	74.9	78.1	81.2	84.6	84.4	85.3	81.6	86.0	83.9	8.0	8.0	8.0	12.3	12.3	12.4	14.4	14.3	14.5	12.1	12.5	12.4			
8	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	80.7	78.1	78.1	74.0	77.1	80.2	83.6	83.6	84.5	80.7	83.1	81.0	8.4	8.6	8.8	12.7	12.8	13.8	14.6	14.6	14.7	12.3	12.8	12.8			
9	17.2	21.9	24.0	28.7	30.0	28.4	25.7	25.6	25.4	25.2	18.4	17.7	72.4	60.8	60.6	54.1	57.2	61.7	64.2	64.3	67.5	62.7	74.8	72.9	8.9	9.8	11.2	13.7	15.8	15.8	14.6	14.6	14.7	13.3	10.6	9.3			
10	20.1	24.2	24.4	30.1	31.4	29.5	26.7	26.6	26.3	26.3	22.2	20.5	62.1	51.4	51.1	46.8	49.8	54.8	59.7	59.9	61.2	56.1	64.6	62.9	9.1	9.8	11.2	13.5	15.6	15.7	14.5	14.5	14.6	13.2	10.9	9.5			
11	22.3	25.8	27.8	30.6	31.9	30.0	27.1	27.0	26.7	24.3	22.7	52.9	44.4	44.0	42.4	45.4	50.7	55.8	56.1	57.5	52.2	59.4	53.8	9.0	9.7	11.0	13.4	15.5	15.6	14.5	14.4	14.6	13.1	10.8	9.5				
12	23.6	28.1	29.3	30.4	31.6	29.9	26.3	26.3	26.3	25.5	23.9	46.0	40.3	39.8	40.3	42.9	49.2	54.4	54.7	56.1	50.7	48.6	47.1	8.9	9.6	10.9	13.5	15.6	15.6	14.5	14.5	14.6	12.8	10.7	9.4				
13	24.1	25.8	28.1	29.6	30.9	29.1	26.4	26.3	26.0	25.0	24.4	41.9	38.8	39.4	41.6	44.6	49.9	55.1	55.4	56.7	51.4	44.6	42.2	8.9	9.7	11.0	12.8	15.7	15.7	14.6	14.6	14.6	12.2	10.6	9.2				
14	23.8	25.1	27.3	29.5	29.8	28.2	25.6	25.5	25.3	25.1	25.0	24.1	40.4	39.5	39.0	43.9	47.0	52.2	57.4	58.0	52.5	43.1	41.7	8.9	9.8	11.1	13.7	15.8	15.8	14.6	14.6	14.7	12.3	10.7	9.2				
15	23.1	24.0	26.2	27.2	28.5	27.1	24.7	24.6	24.4	24.1	25.1	23.5	41.1	41.0	41.3	47.4	50.4	55.4	60.2	60.5	61.0	56.7	43.0	42.4	9.0	9.8	11.2	13.8	15.9	15.9	14.6	14.6	14.7	12.3	10.8	9.4			
16	22.1	22.7	24.8	25.9	27.2	25.9	23.7	23.6	23.5	23.0	24.1	22.5	43.0	45.1	44.6	51.5	54.5	59.2	63.9	64.0	65.2	60.3	46.0	44.6	9.0	9.8	11.2	13.7	15.8	15.7	14.6	14.6	14.7	12.3	10.9	9.5			
17	20.9	21.4	23.4	24.4	25.9	24.8	22.7	22.7	22.5	22.0	22.9	21.3	46.6	48.9	48.5	55.7	58.8	63.2	67.6	67.7	68.9	64.2	49.2	47.7	9.1	9.8	11.1	13.5	15.6	15.6	14.5	14.5	14.6	13.2	10.9	9.5			
18	18.6	20.0	22.0	23.1	24.6	23.7	21.6	21.6	21.7	21.0	20.7	20.1	50.4	53.0	52.7	60.0	63.1	67.2	71.4	71.4	72.5	68.0	53.0	51.4	9.0	9.7	11.0	13.3	15.3	15.4	14.4	14.3	14.5	13.1	10.8	9.5			
19	18.4	18.8	20.7	21.9	22.5	22.7	21.0	21.0	20.9	20.1	20.5	19.9	54.4	57.0	56.7	64.0	67.1	70.9	74.9	74.9	75.9	71.0	57.0	55.3	9.0	9.6	10.9	13.0	15.1	15.1	14.3	14.2	14.3	12.9	10.7	9.4			
20	17.2	17.6	19.5	20.9	22.5	21.9	20.3	20.2	20.2	19.3	19.4	17.7	58.4	60.7	60.5	67.6	70.7	74.4	78.1	78.1	79.1	74.9	60.9	59.2	8.9	9.4	10.6	12.8	14.8	14.9	14.1	14.1	14.2	12.0	10.6	9.3			
21	16.1	16.6	18.4	20.0	21.6	21.1	19.6	19.6	19.6	18.7	18.3	16.7	62.1	64.2	64.0	70.8	74.0	77.4	81.0	80.9	81.8	77.9	64.6	62.8	8.7	9.2	10.4	12.6	14.5	14.7	14.0	13.9	14.1	12.6	10.4	9.1			
22	15.2	15.7	17.5	19.2	20.8	20.4	19.1	19.1	19.1	17.4	16.7	65.5	67.3	67.2	73.7	76.8	80.1	83.5	83.4	84.3	80.4	68.0	66.2	8.6	9.1	10.2	12.3	14.3	14.3	13.8	13.8	13.9	12.5	10.3	9.0				
23	14.3	14.8	16.7	18.5	20.2	19.8	18.6	18.6	18.6	17.6	16.9	69.9	70.9	70.9	76.1	79.2	82.3	85.6	85.6	86.3	82.6	71.0	69.1	8.5	8.6	9.6	12.0	14.1	14.1	14.4	14.3	14.3	12.7	10.4	9.1	8.8			
Promedio	17.3	18.8	20.8	23.2	24.7	23.8	21.8	21.8	21.7	21.1	19.4	17.8	62.0	60.7	60.6	63.9	67.0	70.8	74.8	74.8	75.8	71.4	68.5	62.8	8.6	8.3	9.4	12.8	14.8	14.8	14.0	14.0	14.2	12.8	10.3	9.0			
Desviación	12.7	14.6	15.3	16.1	16.5	12.8	10.6	10.4	10.0	11.3	12.2	13.3	43.4	43.9	44.6	46.3	46.5	43.5	41.0	40.4	39.7	41.9	43.0	42.3	1.2	1.6	2.0	2.5	2.7	2.2	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3			

~ Hora civil de la localidad

Figura 5.10. Hoja 1.1: *Tabla de temperaturas y humedades horarias*

La tabla se divide en tres secciones. La primera enlista los valores horarios de temperatura ambiente, en grados centígrados (°C), mientras que en las dos restantes se presentan los valores horarios de humedad en dos formatos diferentes: humedad relativa, en puntos porcentuales (%), y razón de mezcla, en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (g/kg). Abajo de cada una de las columnas se presenta el promedio mensual y la oscilación diaria-mensual de cada una de las tres variables analizadas. Los resultados de esta tabla se presentan en gráficos en las dos siguientes hojas del bloque, y sirven para alimentar los datos que requieren las herramientas de diagnóstico bioclimático del siguiente bloque.

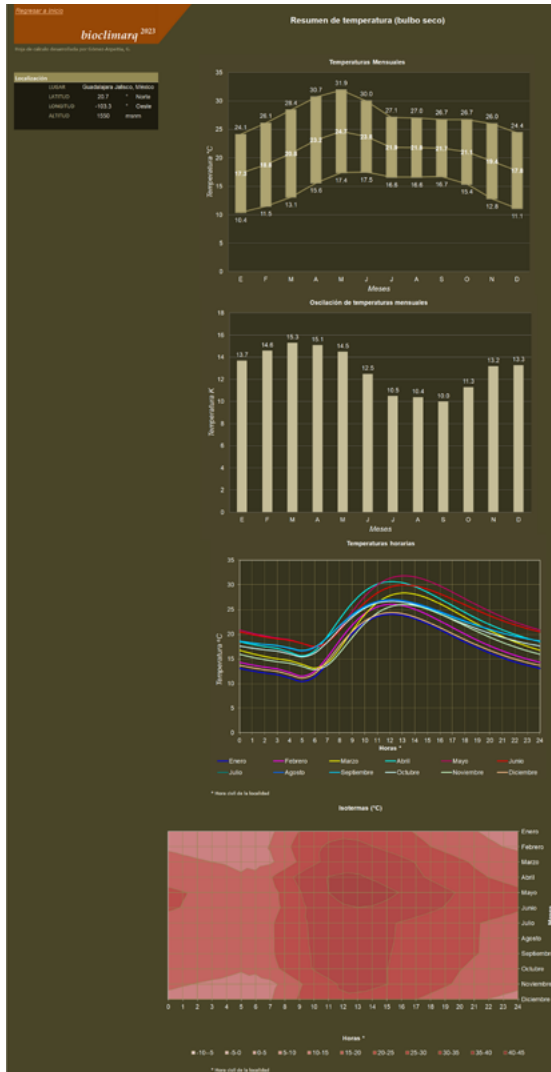


Figura 5.11. Hoja 1.2: *Resumen de temperatura*. Muestra la estructura *tipo* de las hojas 1.2 a 1.4

El contenido de las tres hojas restantes de la sección particular, a saber: *Resumen de temperatura*, *Resumen de humedades* y *Resumen de radiación solar*, se despliegan a la derecha del área de identifica-

ción, en forma de gráficos de barras, de líneas o de superficie. En la figura 5.11 se muestra la hoja 1.2 *Resumen de temperatura*, a manera de ejemplo de la estructura que comparten las tres últimas hojas de la sección particular del bloque de *caracterización climática*.

Como se aprecia en la figura 5.11, la hoja 1.2 *Resumen de temperatura*, contiene cuatro gráficos que muestran:

- a. *Temperaturas mensuales*: Las temperaturas promedio máxima (\bar{T}_{max}), media (\bar{T}_{med}) y mínima (\bar{T}_{min}) de cada mes, en formato de línea con barras. Las ordenadas indican temperatura (en °C) y las abscisas los meses del año. Cada línea muestra la trayectoria anual de cada uno de las tres variables analizadas, en tanto que las barras presentan una longitud determinada por la oscilación térmica promedio del día típico de cada mes ($\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min}$). El gráfico permite visualizar tanto la intensidad del régimen de temperaturas en el sitio, como su variación a lo largo del año (figura 5.12).

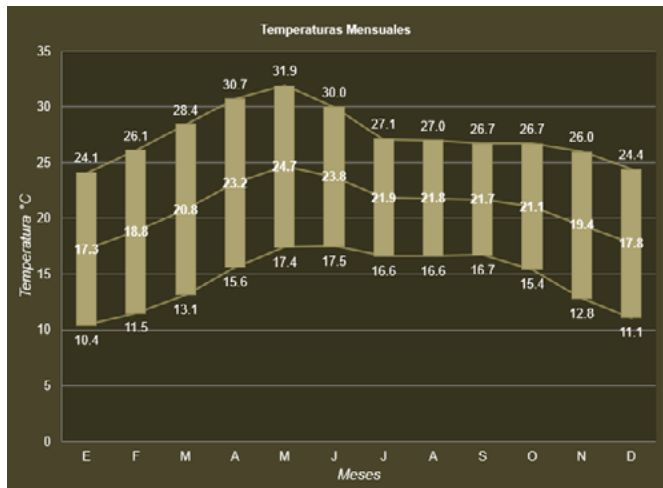


Figura 5.12. Gráfico de *Temperaturas mensuales* en hoja 1.2 *Resumen de temperatura*.

- b. *Oscilación de temperaturas mensuales*: Los valores de oscilación térmica promedio del día típico de cada mes, se destacan

en un gráfico de barras que permite visualizarlos con mayor detalle. Las ordenadas corresponden nuevamente a la temperatura, sólo que esta vez en grados Kelvin (K) dado que indica rangos, no datos puntuales, y las abscisas indican los meses del año. A mayor altura de la barra, mayor diversidad de condiciones en un solo día; a menor altura mayor estabilidad de condiciones a lo largo del día (figura 5.13).

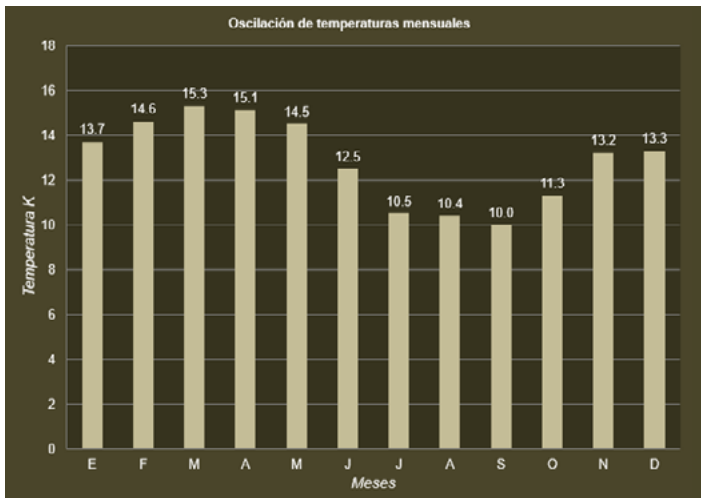


Figura 5.13. Gráfico de *Oscilación de temperaturas mensuales* en hoja 1.2 *Resumen de temperatura*

- c. *Temperaturas horarias*: Las temperaturas horarias enlistadas en la tabla contenida en la hoja 1.1 se muestran en un gráfico de línea, donde las ordenadas indican temperatura en °C, pero esta vez las abscisas representan las veinticuatro horas del día, en correspondencia al horario civil. El gráfico muestra doce líneas, cada una representando la trayectoria de la temperatura a lo largo de un día típico de cada mes. La simbología por color se muestra abajo del gráfico y permite identificar la curva que le corresponde a cada mes.

El gráfico puede ayudar a visualizar si hay diversidad en el trayecto de las diferentes curvas o si se trata de un comportamiento estable a lo largo del año (figura 5.14).

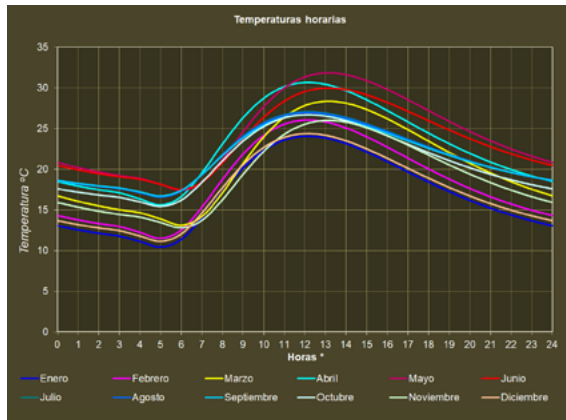


Figura 5.14. Gráfico de *Temperaturas horarias* en hoja 1.2 *Resumen de temperatura*

- d. *Isotermas*: Las temperaturas horarias mostradas en el gráfico anterior se muestran nuevamente pero en un gráfico de superficie, donde las ordenadas despliegan ahora los meses del año, las abscisas las horas del día (en hora civil) y las cotas (cuyo eje no se muestra) temperatura en °C. La intensidad térmica se muestra mediante un gradiente cromático. A mayor intensidad del color, mayor la magnitud de la temperatura. Este arreglo permite visualizar con mucha precisión el régimen térmico del sitio todo el año y a toda hora con un sólo golpe de vista. Las agrupaciones de celdas pálidas indican los periodos frescos del año, en tanto que las agrupaciones de celdas oscuras revelan los periodos cálidos. La línea que bordea cada campo de color representa el momento cuando la temperatura cambia de magnitud, por lo que representa puntos a lo largo del año con la misma temperatura, de ahí su nombre de *isotermas*, Abajo del gráfico se muestra la simbología que permite in-

interpretar el tono cromático con un rango de temperatura que va de 5 en 5 grados (K), en una escala de -10 °C hasta 45 °C (figura 5.15).



Figura 5.15. Gráfico de *Isotermas* en hoja 1.2 *Resumen de temperatura*

La hoja 1.3 *Resumen de humedades*, a diferencia de la hoja anterior, muestra dos columnas de resultados, una para cada formato de humedad analizado.

En la columna correspondiente a la *humedad relativa* podemos encontrar tres gráficos:

- a. *Humedad relativa mensual*: Las humedades relativas promedio máxima (\overline{HR}_{max}), media (\overline{HR}_{med}) y mínima (\overline{HR}_{min}) de cada mes, en formato de línea con barras. Las ordenadas expresan humedad relativa (en %) y las abscisas los meses del año. Cada línea muestra la trayectoria anual de cada uno de los tres parámetros analizados, en tanto que las barras presentan una longitud determinada por la oscilación higrúica promedio del día típico de cada mes ($\overline{HR}_{max} - \overline{HR}_{min}$). El gráfico permite visualizar tanto la intensidad del régimen

de humedad relativa en el sitio, como su variación a lo largo del año (figura 5.16).

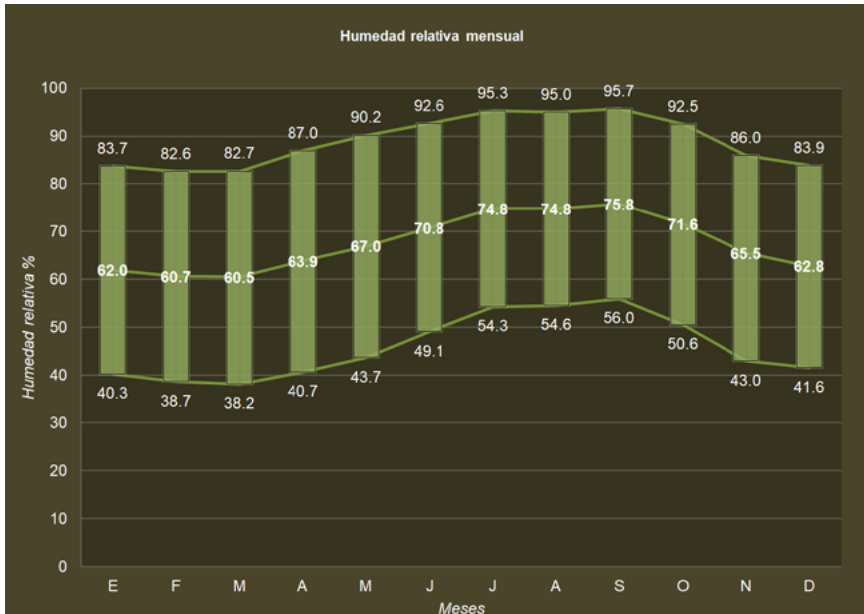


Figura 5.16. Gráfico de *Humedad relativa mensual* en hoja 1.3 *Resumen de humedad*

- b. *Humedades horarias*: Las humedades relativas horarias enlistadas en la tabla contenida en la hoja 1.1 se muestran en un gráfico de línea, donde las ordenadas siguen expresando humedad relativa en %, pero las abscisas indican ahora las veinticuatro horas del día, en correspondencia al horario civil. El gráfico muestra doce líneas, cada una representando la trayectoria de la humedad relativa a lo largo de un día típico de cada mes. La simbología por color se muestra abajo del gráfico y permite identificar la curva que le corresponde a cada mes. El gráfico puede ayudar a visualizar si hay diversidad en el trayecto de las diferentes curvas o si se trata de un comportamiento estable a lo largo del año (figura 5.17).

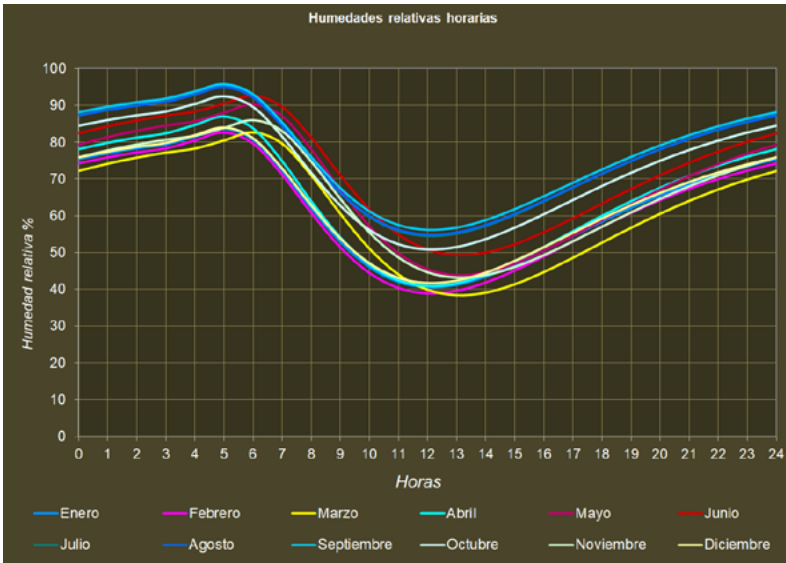


Figura 5.17. Gráfico de *Humedades relativas horarias* en hoja 1.3 *Resumen de humedades*

- c. *Isobigras*: Las humedades relativas horarias mostradas en el gráfico anterior se despliegan ahora en un gráfico de superficie, donde las ordenadas indican los meses del año, las abscisas las horas del día (en hora civil) y las cotas (cuyo eje no es mostrado) humedad relativa en %. La intensidad higríca se muestra mediante un gradiente cromático. A mayor intensidad del color, mayor la saturación de humedad, lo que permite visualizar con mucha precisión el régimen higríco del sitio todo el año y a toda hora con un solo golpe de vista. Las agrupaciones de celdas pálidas indican los periodos menos húmedos del año, en tanto que las agrupaciones de celdas oscuras revelan los periodos de mayor humedad. La línea que bordea cada campo de color representa el momento cuando el grado de saturación cambia de magnitud, por lo que representa puntos a lo largo del año con la misma humedad relativa, de ahí su nombre de

isohigras, Abajo del gráfico se muestra la simbología que permite interpretar el tono cromático con un rango de humedad que va de 5 en 5 puntos porcentuales, en una escala de 0% hasta 100% (figura 5.18).

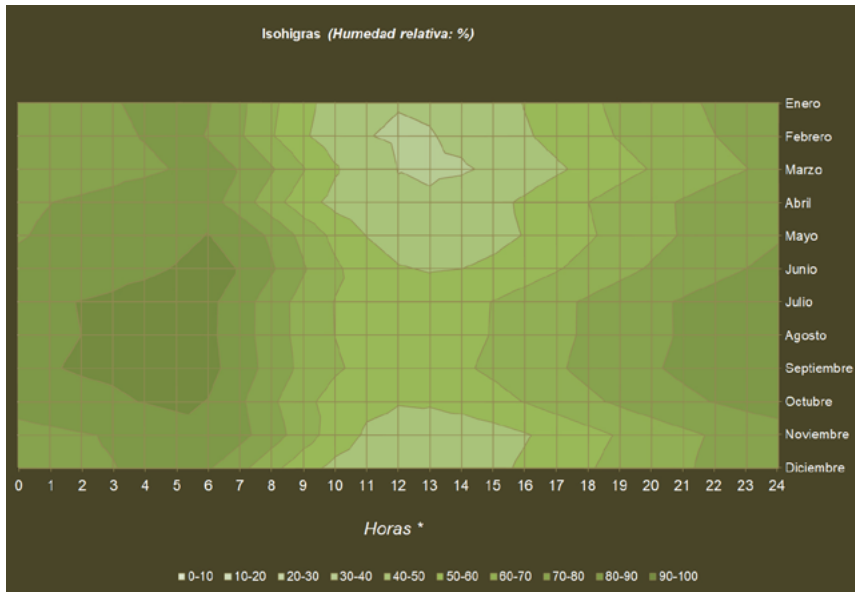


Figura 5.18. Gráfico de *Isohigras (humedad relativa)* en hoja 1.3 *Resumen de humedades*.

Por su parte en la columna correspondiente a la *razón de mezcla*, se muestran tres gráficos que coinciden en su descripción a los descritos en la columna de *humedad relativa*, con la única diferencia de que se han sustituido los valores de humedad relativa, expresados en puntos porcentuales (%), por los valores correspondientes de razón de mezcla, expresados en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (g/kg). En el gráfico de *isohigras* el gradiente de humedad va de 4 en 4 g/kg, en una escala de 0 a 24 g/kg (figura 5.19).



Figura 5.19. Gráficos de *razón de mezcla* en hoja 1.3 *Resumen de humedades*
 Arriba izquierda: *Razón de mezcla mensual.*
 Arriba derecha: *Razón de mezcla horaria*
 Abajo: *Isohigras (razón de mezcla)*

La comparación de los resultados de las condiciones de humedad vistos mediante estas dos formas diferentes permite identificar cómo el grado de saturación del aire es mucho más diverso, tanto a lo largo del día como del año, que la cantidad de vapor de agua contenida en él, la cual se mantiene prácticamente estable todo el tiempo. Esto permite mostrar por qué la temperatura ejerce una influencia determinante en la saturación de humedad en el

aire —y por eso es que esa forma de medir la humedad es *relativa* a la temperatura—, lo que no sucede así con la cantidad de vapor de agua, que se mide como *razón de mezcla* (gramos de vapor por kilogramo de aire seco), pero también mediante otras variables atmosféricas como la *humedad absoluta* (gramos de vapor por m³ de aire) o la *humedad específica* (gramos de vapor por kilogramo de aire), que en condiciones más o menos usuales prácticamente son iguales en magnitud. Para tener mayor claridad en los resultados mostrados en esta hoja se recomienda revisar el apartado 2.3.4 de este libro.

La hoja 1.4 *Resumen de radiación solar* contiene tres gráficos:

- a. *Radiación incidente*: La radiación solar incidente en día típico de cada mes en formato de líneas. Las ordenadas corresponden a radiación en W/m² día y las abscisas a los meses del año. Cada curva desplegada indica la magnitud de la radiación que incide sobre uno de cuatro planos diferentes: horizontal, vertical orientado al Norte, vertical orientado al Sur y vertical orientado indistintamente al Este o al Oeste. Sobre cada uno de estos planos se muestran dos escenarios diferentes: con línea punteada se indica la magnitud de la radiación con cielo despejado, y con línea continua la magnitud de la radiación en condiciones de nublados *típicos*. Abajo del gráfico se muestra la simbología para identificar cada caso a base de colores. La variación observada en la radiación incidente sobre los planos verticales orientados al Norte y al Sur depende fundamentalmente de la latitud del sitio. La diferencia y variabilidad entre las curvas correspondientes a cielo despejado y a nublados típicos para un mismo plano depende de las temporadas de lluvias y/o nublados que acontecen durante el año (figura 5.20).

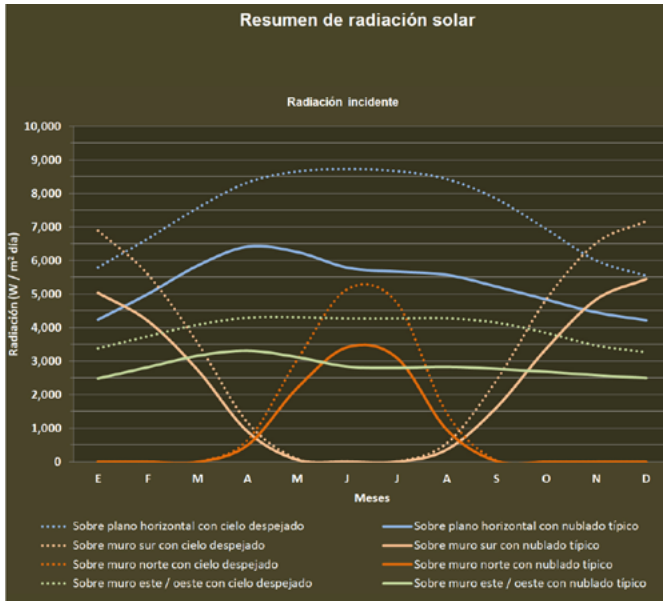


Figura 5.20. Gráfico de *Radiación incidente* en hoja 1.4 *Resumen de radiación*

- b. *Brillo solar*: Las horas de sol al mes en formato de líneas. Las ordenadas indican el brillo solar, en horas con sol al mes, y las abscisas los meses del año. Se despliegan dos curvas correspondientes a la manera de cuantificar el brillo solar, a saber: el astronómico que muestra las horas de sol que recibiría la superficie de la Tierra en función de factores astronómicos como el ángulo de declinación solar y geográficos como la latitud, en condiciones de cielo despejado; y el efectivo que muestra las horas de sol realmente recibidas en la superficie por efecto del bloqueo atmosférico —constituido fundamentalmente por la nubosidad—. Abajo del gráfico se muestra la simbología por color para cada forma de cuantificación del brillo solar. La diferencia y variabilidad de ambas curvas da una idea clara de las condiciones de cielo despejado o nublado a lo largo del año (figura 5.21).

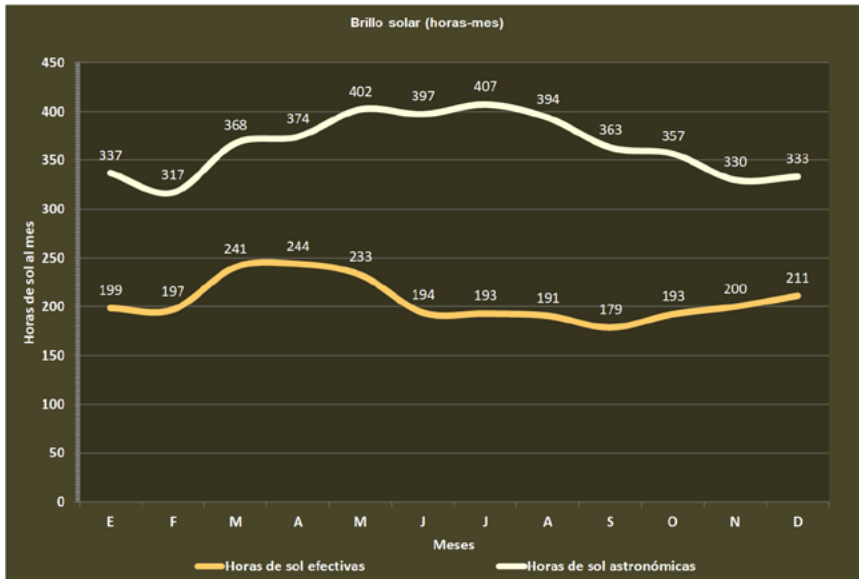


Figura 5.21. Gráfico de *Brillo solar* en hoja 1.4 *Resumen de radiación*

- c. *Factor de soleamiento efectivo por nublados típicos al mes*: El factor de soleamiento efectivo derivado de la relación entre brillo solar efectivo y brillo solar astronómico (BS_e/BS_a) para cada mes en formato de barras. Las ordenadas expresan el factor de soleamiento efectivo (adimensional, de 0 a 1) y las abscisas los meses del año. El factor se emplea para obtener la magnitud de la radiación solar incidente en condiciones de nublados típicos, multiplicándolo por la radiación solar incidente en condiciones de cielo despejado. La magnitud de la barra indica la disponibilidad de sol en un día típico de cada mes: a mayor longitud mayor disponibilidad de soleamiento (figura 5.22).

La sección de carácter conclusivo del bloque se integra por la hoja 1.5 *Resumen del clima*. Su estructura —compartida por todas las hojas de carácter conclusivo de los tres bloques temáticos— está constituida por dos columnas. La columna localizada a la iz-

quierda de la hoja inserta un resumen ejecutivo de las condiciones que caracterizan el clima del lugar. La columna a la derecha de la hoja muestra la identificación de *bioclimarq*, los datos del desarrollador, así como información de diversa índole que ilustra con más detalle lo abordado en el resumen en forma de gráficos, tablas o ilustraciones (ver figura 5.23).

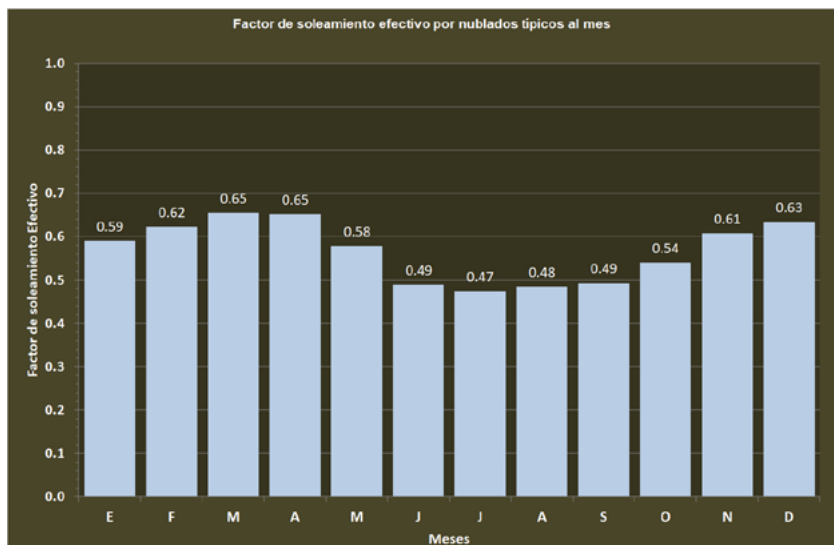


Figura 5.22. Gráfico de *Factor de soleamiento efectivo* en hoja 1.4 *Resumen de radiación*

El resumen ejecutivo de la hoja 1.5 *Resumen del clima* se compone de dos elementos: un cuadro, denominado *Localización*, con los datos de localización geográfica (nombre del lugar, latitud, longitud y altitud), ubicado en la parte superior, y el reporte que contiene el resumen ejecutivo, denominado *Resumen del clima anual y estacional* (figura 5.23).

El reporte se estructura en dos apartados. El primero lleva el título de *Condiciones prevalentes* y describe las características predominantes del clima a lo largo del año y, en el caso de presentar variabilidad, las características correspondientes a cada una de

las temporadas identificadas, las cuales pueden ser hasta tres. En caso de que el análisis hecho por *bioclimarq* identifique más de una temporada al año, además de precisar sus características predominantes, señala los meses que ocupa. Las temporadas se definen en función de la sensación térmica predominante, que puede ser fría, neutra, cálida, o extremosa —es decir, con condiciones frías y cálidas en un mismo día—. El apartado desglosa los valores correspondientes a cada uno de los indicadores empleados para la caracterización: temperatura promedio (T en $^{\circ}\text{C}$), radiación media sobre plano horizontal con nublados típicos (Q_g en W/m^2), precipitación pluvial total (PPT en mm), humedad relativa promedio (HR en $\%$) y razón de mezcla (rw en g/kg).

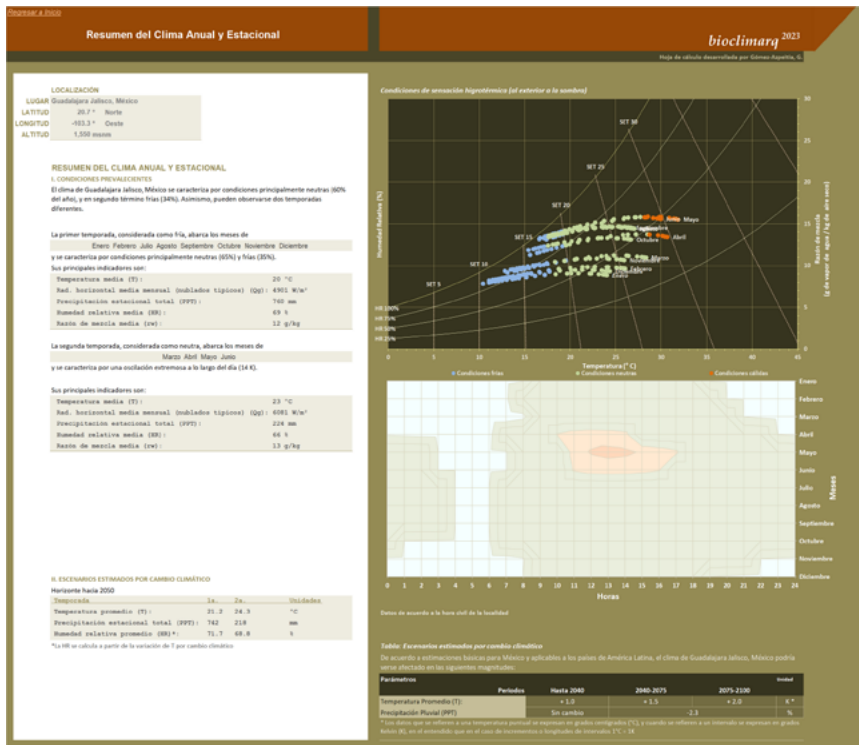


Figura 5.23. Hoja 1.5 *Resumen del clima*. Muestra la estructura *tipo* de las hojas de carácter conclusivo 1.5, 2.7 y 3.3.

El segundo apartado denominado *Escenarios estimados por cambio climático* presenta las condiciones consideradas para el horizonte cercano al año 2050, organizadas en una tabla que desglosa los valores estimados para cada temporada de los siguientes indicadores: temperatura promedio (T en $^{\circ}\text{C}$), precipitación pluvial total (PPT en mm) y humedad relativa promedio (HR en %), suponiendo una trayectoria representativa de concentración RCP correspondiente a un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 (la menos optimista). Para mayor comprensión de los escenarios por cambio climático véase el apartado 4.3 de este libro.

La información suplementaria del resumen del clima, desplegada en la columna derecha de la hoja, se compone de dos gráficos y una tabla.

- a. *Condiciones de sensación bigrotérmica (al exterior a la sombra)*: Los datos simultáneos de temperatura y humedad determinan doce series de puntos que representan las condiciones horarias de un día típico de cada mes. Los puntos están graficados sobre una carta psicrométrica cuyas ordenadas denotan razón de mezcla (en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, g/kg) y las abscisas temperatura operativa (en $^{\circ}\text{C}$). Las curvas continuas indican humedad relativa (en %) y las rectas de inclinación variable representan valores de SET (temperatura efectiva estándar, en $^{\circ}\text{C}$). Los puntos indicativos de condiciones horarias llevan un color en función de la sensación térmica que implican. La simbología de colores se despliega abajo del gráfico: azul para condiciones frías, verde para condiciones neutras y rojo para condiciones cálidas. Cuando en un mismo mes ocurren las tres condiciones, se considera de carácter extremo (figura 5.24).

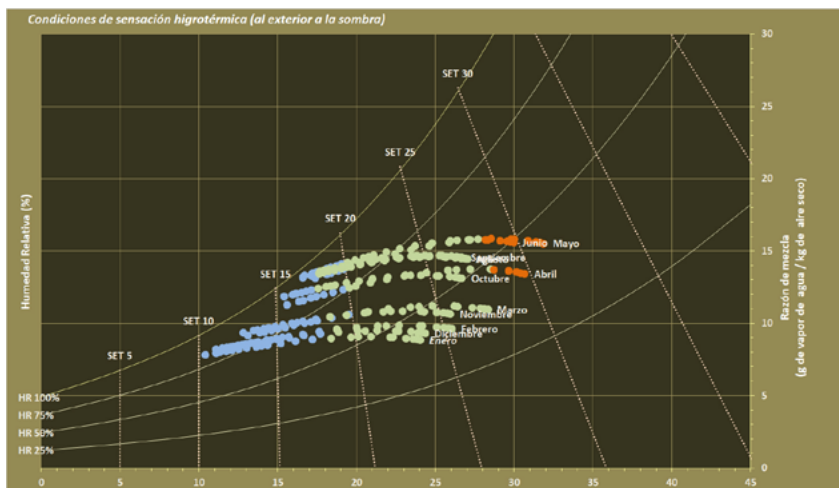


Figura 5.24. Gráfico de *Condiciones de sensación higrotérmica (al exterior a la sombra)* en la hoja 1.5 *Resumen del clima*.

- b. La segunda gráfica corresponde también a las *Condiciones de sensación higrotérmica* pero ahora dispuestas en un gráfico de superficie, cuyas ordenadas indican los meses del año, las abscisas las horas del día (en hora civil) y las cotas (cuyo eje no se muestra) el tipo de sensación térmica percibida. Así, es posible identificar a simple vista la concentración de condiciones frías, neutras y cálidas a lo largo del año y según la hora del día (figura 5.25).
- c. *Escenarios estimados por cambio climático*: tabla que compila los criterios para estimar los cambios de temperatura y precipitación pluvial en horizontes de corto plazo (2040), mediano plazo (2040-2075) y largo plazo (2075-2100) por cambio climático. se basan en proyecciones para México, aunque aplicables al resto de América Latina, basadas en la trayectoria representativa de concentración (RCP) menos optimista de las consideradas por el IPCC, correspondiente a un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 (figura 5.26).

Para mejor comprensión del tema se sugiere ver el apartado 4.3 de este libro.

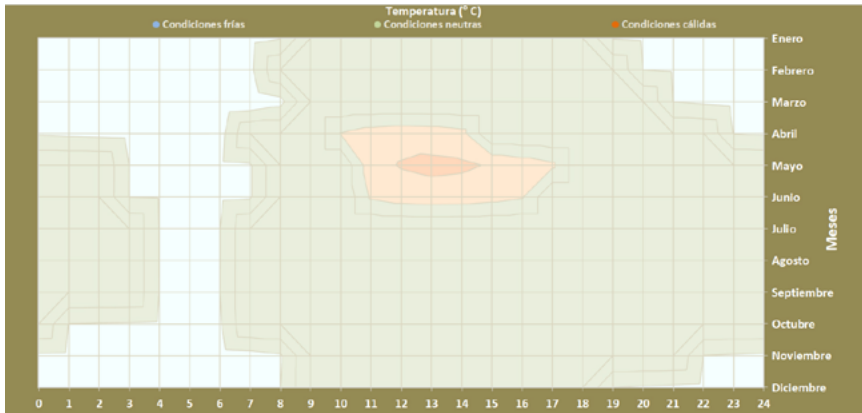


Figura 5.25. Gráfico de superficie que muestra las *condiciones de sensación higrotérmica* a lo largo del año en la hoja 1.5 *Resumen del clima*.

Tabla: Escenarios estimados por cambio climático

De acuerdo a estimaciones básicas para México y aplicables a los países de América Latina, el clima de Guadalajara Jalisco, México podría verse afectado en las siguientes magnitudes:

Parámetros	Periodos			Unidad
	Hasta 2040	2040-2075	2075-2100	
Temperatura Promedio (T):	+ 1.0	+ 1.5	+ 2.0	K *
Precipitación Pluvial (PPT)	Sin cambio		-2.3	%

* Los datos que se refieren a una temperatura puntual se expresan en grados centígrados (°C), y cuando se refieren a un intervalo se expresan en grados Kelvin (K), en el entendido que en el caso de incrementos o longitudes de intervalos 1°C = 1K

Figura 5.26. *Tabla de escenarios estimados por cambio climático* en la hoja 1.5 *Resumen del clima*

Bloque 2: Diagnóstico bioclimático

Este bloque tiene la misión de confrontar la información climática sistematizada en el bloque anterior con diversas herramientas de diagnóstico de confort térmico, tanto de enfoque predictivo como adaptativo (explicados en el apartado 3.3 de este libro), con el fin de determinar los requerimientos de climatización e identificar las estrategias de climatización aplicables al proyecto.

La sección particular del bloque se compone de cinco hojas con una estructura homóloga, compuesta por dos segmentos (fi-

gura 5.27). El segmento localizado al margen izquierdo contiene los siguientes componentes:

- a. La identificación de *bioclimarq*;
- b. Datos del desarrollador;
- c. Referencias bibliográficas que dan soporte teórico a la herramienta de diagnóstico que se presenta en la hoja;
- d. Un cuadro de datos con la *localización geográfica* del lugar: nombre, latitud, longitud y altitud;
- e. Un cuadro de *estrategias adecuadas al clima* donde se enlistan las estrategias consideradas en la herramienta de diagnóstico incluyendo el porcentaje de tiempo en que resultan útiles para el clima analizado. El cuadro puede contener alguna información complementaria relevante para la herramienta de diagnóstico en cuestión;
- f. Un cuadro de *Temporadas* donde el usuario puede elegir la visualización del diagnóstico anual o por temporada (en el caso de que el clima presente más de una caracterización), mediante el clickeo sobre el botón de opción correspondiente. Sólo se permite una opción a la vez. En caso de que el clima no presente temporadas al año, sólo el botón de opción anual tendrá efecto en la visualización de la herramienta de diagnóstico desplegada en el segmento derecho de la hoja; y
- g. Un cuadro de *Variaciones* donde el usuario puede elegir la visualización del diagnóstico considerando o no factores de isla de calor urbana (IUC) y de cambio climático para los horizontes al 2050 y 2100. Para ello debe clickear sobre la(s) casilla(s) correspondiente(s), en el entendido que pueden ser seleccionadas más de una casilla a la vez, en cuyo caso los resultados serán acumulativos en la visualización de la herramienta de diagnóstico desplegada en el segmento derecho de la hoja.

Por su parte el segmento localizado en el margen derecho de la hoja contiene una o más gráficas que ilustran la herramienta de diagnóstico, en donde se puede apreciar la zona de confort correspondiente delimitada por líneas blancas, las zonas de aplicación de estrategias delimitadas con líneas de colores, curvas de color gris que representan los datos horarios de temperatura-humedad de un día típico de cada mes y una serie de puntos amarillos que representan los datos horarios de temperatura-humedad de un día típico de la temporada seleccionada. El segmento puede contener también información adicional relevante para la interpretación de la herramienta de diagnóstico (figura 5.27).

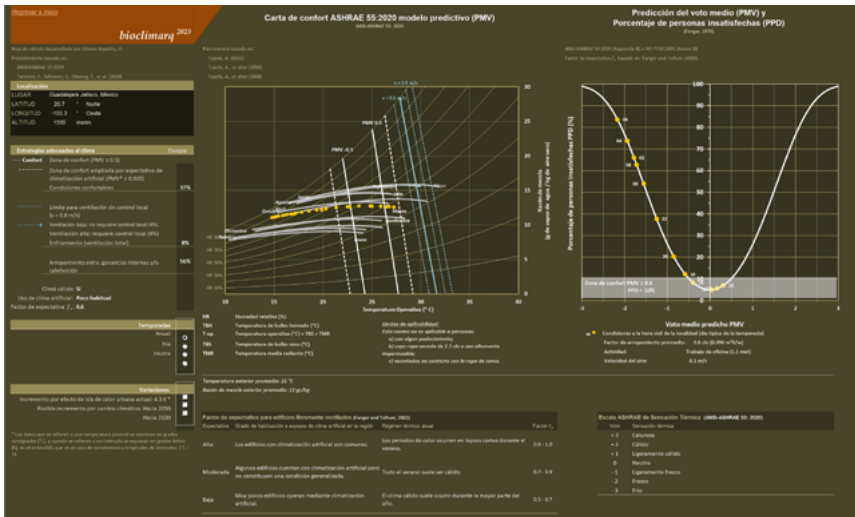


Figura 5.27. Hoja 2.1: *Carta de confort ASHRAE 55:2020 modelo predictivo (PMV)*. Muestra la estructura tipo de las hojas 2.1 a 2.5.

La hoja 2.1 *Carta de confort ASHRAE 55:2020 modelo predictivo (PMV)*, fundamenta su diagnóstico particular basado en la norma americana que le da nombre. La norma aborda los dos enfoques teóricos del confort térmico, planteando que la aplicabilidad del enfoque predictivo, fundamentado en los indicadores de PMV y PPD, se dirige fundamentalmente a edificios con climatización

mecánica. Sin embargo, para cumplir con el propósito de privilegiar los medios de climatización pasiva que comparte *bioclimarq*, se ha aplicado el *factor de expectativa para edificios libremente ventilados* (f) (no incluido en la norma, pero propuesto por Fanger), que ajusta el rango de confort según el grado de habituación a los sistemas de climatización artificial. Ese es el enfoque, digamos, híbrido que encarna la carta de confort contenida en esta hoja. Como se aprecia en la figura 5.27, la hoja incluye dos gráficos y dos tablas:

- a. La *carta de confort de ASHRAE 55* desarrollada en un diagrama psicrométrico cuyas ordenadas expresan razón de mezcla (en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, g/kg) y las abscisas temperatura operativa (en °C). Las curvas continuas indican humedad relativa (HR en %) y las rectas de inclinación variable representan valores de SET (temperatura efectiva estándar, en °C). La zona de confort se define entre los valores ± 0.5 de PMV , lo que representa un porcentaje de personas insatisfecha de 10% (con línea continua). La zona de confort puede ampliarse para edificios libremente ventilados en función del factor de expectativa de clima artificial (f) de la localidad (línea punteada). La única estrategia considerada es la ventilación, cuyas zonas de aplicación se delimitan con líneas azules. El límite máximo de velocidad para ventilación sin control local operado por el ocupante se establece en 0.8 m/s (con línea continua). Velocidades mayores demandan control local operado por el ocupante. Los límites de todas las zonas de la carta se expresan en términos del índice SET . La superposición de las condiciones promedio de la temporada (puntos amarillos) o de las condiciones de cada mes en particular (curvas grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican ya sea la necesidad de calefacción (a la izquierda de la zona de confort), la condición de confort,

la oportunidad de aplicación de la estrategia considerada o la necesidad de enfriamiento adicional (a la derecha de la línea de 1.5 m/s de ventilación). Encima del gráfico se hace referencia a las fuentes de donde se tomaron las fórmulas con que fueron calculados los parámetros que intervienen en la carta. Abajo del gráfico se inserta la simbología de indicadores utilizados y la aclaración de los límites de aplicabilidad de la carta (figura 5.28).

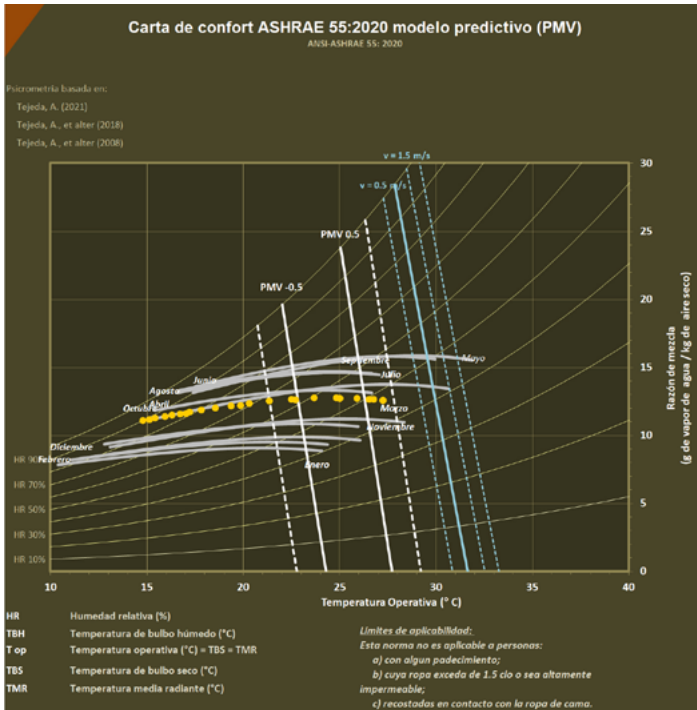


Figura 5.28. Carta de confort ASHRAE 55:2020 modelo predictivo (PMV) en la hoja 2.1.

- b. La carta de *Voto medio predicho (PMV)* y *Porcentaje de personas insatisfechas (PPD)* desarrollada en un gráfico cartesiano cuyas ordenadas indican el PPD en puntos porcentuales (%) y las abscisas el PMV (adimensional). La curva tipo *campana*

de Gauss invertida (línea blanca) representa la intersección de valores de PMV y PPD: a mayor alejamiento del valor cero de PMV mayor el porcentaje de personas insatisfechas (PPD). La zona coloreada de gris, en la base del gráfico, indica el límite de confort térmico en ± 0.5 de PMV correspondiente a un 10% de PPD (lo que equivale a un 90% de aceptación). Los puntos amarillos representan las condiciones de temperatura-humedad horaria (hora civil) de un día típico de la temporada determinando así los valores de PMV-PPD que les corresponden. Encima del gráfico se hace referencia a las fuentes de donde se tomaron las fórmulas con que se determinó el trazado de la carta. Abajo del gráfico se inserta la simbología de los datos incorporados así como los valores de arropamiento, trabajo y velocidad de viento que fueron considerados (figura 5.29).

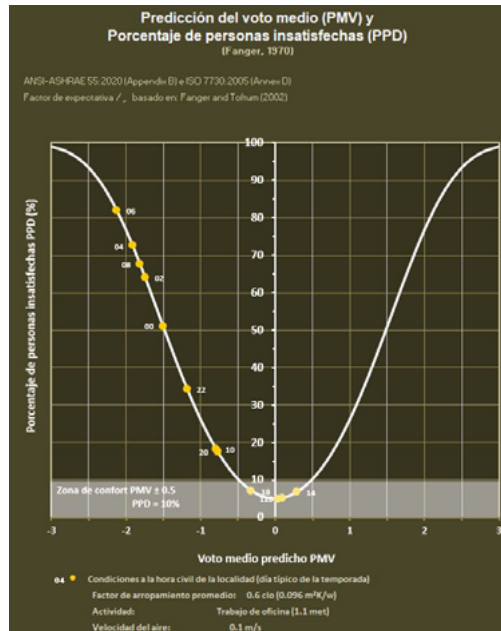


Figura 5.29. Predicción del voto medio (PMV) y Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en la hoja 2.1.

- c. Tabla *Factor de expectativa para edificios libremente ventilados* donde se establecen los criterios para determinar el valor del mencionado factor de expectativa (f_p) (tabla 3.4 de este libro) (figura 5.30).
- d. Tabla *Escala ASHRAE de Sensación Térmica* donde se establece la correspondencia entre el juicio subjetivo de sensación térmica y el valor correspondiente del voto de sensación térmica empleado para determinar el PMV (tabla 3.3 de este libro) (figura 5.30).

Factor de expectativa para edificios libremente ventilados (según ASHRAE 55-2010)			Escala ASHRAE de Sensación Térmica (ANSI-ASHRAE 55-2010)		
Especialista	Grado de habituación a equipos de clima artificial en la región	Porcentaje de calor que ocurre en lapsos cortos durante el verano	Factor f_p	Voto	Sensación térmica
Alta	Los edificios con climatización artificial son comunes.	Los períodos de calor ocurren en lapsos cortos durante el verano.	0.9 - 1.0	+3	Caluroso
				+2	Cálido
				+1	Ligeramente cálido
				0	Neutro
Moderada	Algunos edificios cuentan con climatización artificial pero no constituyen una condición generalizada.	Todo el verano suele ser cálido.	0.7 - 0.9	-1	Ligeramente fresco
				-2	Fresco
				-3	Frío
Baja	May pocos edificios operan mediante climatización artificial.	El clima cálido suele ocurrir durante la mayor parte del año.	0.5 - 0.7		

Figura 5.30. Tablas de *Factor de expectativa para edificios libremente ventilados* y *Escala ASHRAE de Sensación Térmica* en la hoja 2.1.

La hoja 2.2 *Carta de confort ASHRAE 55-2020 (Adaptativo)* se fundamenta, al igual que la hoja 2.1, en la norma americana que le da nombre, pero en este caso, aludiendo al enfoque adaptativo del confort térmico, y por lo tanto, de aplicación exclusiva para edificios libremente ventilados. La hoja presenta dicha carta en su margen derecho, la cual ha sido desarrollada en un gráfico cartesiano. Las ordenadas representan temperatura operativa (en °C) cuyos datos deben entenderse como interiores; y las abscisas corresponden a temperaturas exteriores promedio (también en °C). La zona de confort se delimita por líneas blancas, para un 90% de aceptación con líneas punteadas y para 80% con líneas continuas, siendo este límite el recomendado por la norma. El espacio entre los dos límites de la zona de confort aparece sombreado en gris. El estándar sólo es aplicable para condiciones de temperatura exterior entre 10 °C y 33.5 °C. La única estrategia considerada es la ventilación, representada por líneas punteadas de color azul, cuyo

límite de comodidad es 1.2 m/s. Las series de puntos grises representan las condiciones térmicas horarias de un día típico de cada mes. La serie de puntos amarillos indica las condiciones de un día típico de la temporada. La superposición de las condiciones promedio de la temporada (puntos amarillos) o de las condiciones de cada mes en particular (puntos grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican ya sea la necesidad de calefacción (abajo de la zona de confort), la condición de confort, la oportunidad de aplicación de la única estrategia considerada o la necesidad de enfriamiento adicional (arriba de la línea de 1.2 m/s de ventilación). Abajo del gráfico se inserta la simbología de los indicadores utilizados así como los criterios de adaptabilidad, trabajo y velocidad de viento que fueron considerados (figura 5.31).

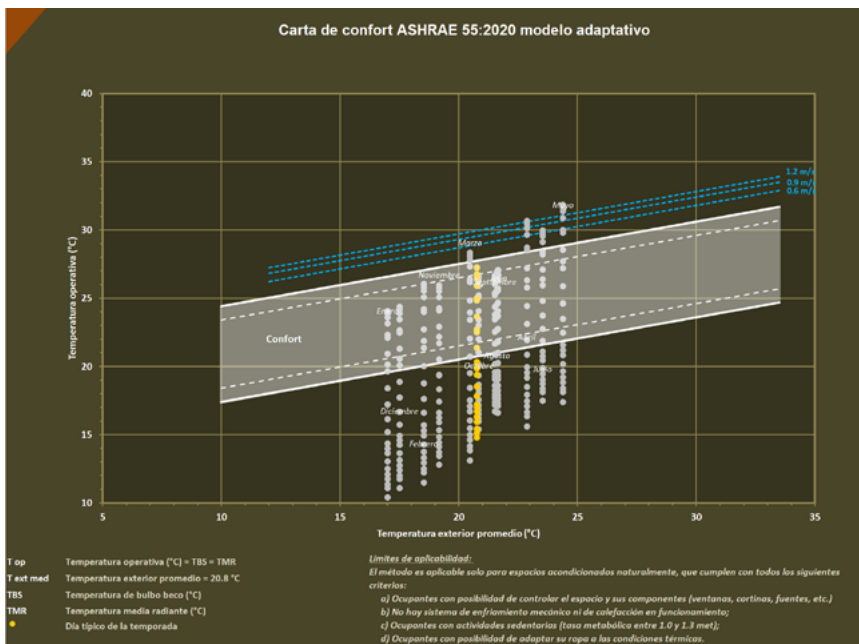


Figura 5.31. Carta de confort ASHRAE 55:2020 modelo adaptativo en la hoja 2.2.

La hoja 2.3 *Carta bioclimática de Olgay* despliega la primera carta de este tipo, publicada por Víctor Olgay en 1963. Se desarro-

lla en un gráfico cartesiano cuyas ordenadas expresan humedad relativa (en puntos porcentuales, %) y las abscisas temperatura de bulbo seco (también llamada temperatura ambiente, en °C). La zona de confort, al centro de la carta, se delimita mediante líneas blancas cuya silueta semeja la sección de un ala de avión (sobre la determinación de esta carta se recomienda revisar los apartados 3.3.4 y 5.2.3.b de este libro). El límite inferior de la zona de confort coincide con una línea punteada color gris, llamada *de sombra*, que representa el límite de tolerancia a la exposición solar, por lo que a temperaturas por encima de esa línea se recomienda permanecer a la sombra o al interior de edificios. En la parte superior derecha de la carta se despliega otra línea punteada color gris que señala el límite tolerable de trabajo de intensidad media (figura 5.32).

Olgyay considera tres estrategias de climatización (figura 5.32):

- a. Calentamiento pasivo, por abajo de la zona de confort, indicado con líneas punteadas color rosa para intensidad ligera (hasta 30 W) y con líneas punteadas color rojo para intensidad media (entre 30 y 90 W);
- b. Ventilación, por encima de la zona de confort, señalado con líneas punteadas color azul. El límite máximo de velocidad de viento considerado es de 3.0 m/s
- c. Enfriamiento evaporativo, por encima y a la izquierda de la zona de confort, indicado con líneas punteadas color verde. El límite máximo de humidificación considerado es de 3.575 cm³ de agua por kilogramo de aire.

Al igual que en las otras cartas incluidas en este bloque, las líneas continuas de color gris representan las condiciones higrotérmicas de un día típico de cada mes y la serie de puntos amarillos indica las condiciones higrotérmicas horarias de un día típico de la temporada. La superposición de las condiciones promedio de

la temporada (puntos amarillos) o de las condiciones de cada mes en particular (líneas grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican ya sea la necesidad de calefacción mecánica (abajo de la línea de 90 W de calentamiento pasivo), la oportunidad de aplicación de la estrategia de calentamiento pasivo (debajo de la zona de confort), la condición de confort, la oportunidad de aplicación de estrategia de ventilación (arriba de la zona de confort); la oportunidad de aplicación de la estrategia de enfriamiento evaporativo (arriba y a la izquierda de la zona de confort), o la necesidad de enfriamiento adicional mediante aire acondicionado (arriba de la línea de 3.0 m/s de ventilación). Abajo del gráfico se inserta la simbología de los indicadores utilizados así como las variables que fueron involucradas (figura 5.32).

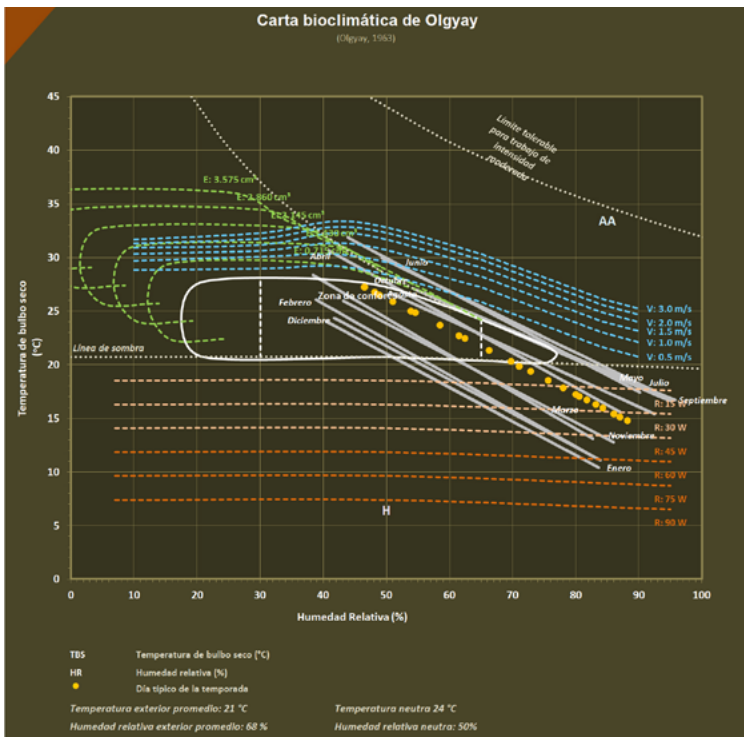


Figura 5.32. Carta bioclimática de Olgay en la hoja 2.3.

La hoja 2.4 *Carta bioclimática para edificios (BBCC) de Givoni* contiene la herramienta de diagnóstico que Baruch Givoni desarrolló como respuesta a la propuesta de Olgyay, de acuerdo con los criterios tanto de su propuesta original (1969) como de las adecuaciones hechas en 1998 (para mayor comprensión del trazado de esta carta se recomienda revisar los apartados 3.3.4 y 5.2.3.b de este libro). Givoni es quien por primera vez utiliza un diagrama psicrométrico como base para una carta bioclimática, cuyas ordenadas expresan razón de mezcla (en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, g/kg); las abscisas indican temperatura de bulbo seco (temperatura ambiente, en °C); las líneas curvas constantes indican humedad relativa (*HR* en %) y las rectas de inclinación variable corresponden a temperatura de bulbo húmedo (*TBH* en °C) (para mejor comprensión de las modalidades de medición de temperatura se recomienda ver el capítulo 2 de este libro). La zona de confort, al centro de la carta, se delimita con líneas blancas (figura 5.33).

Givoni plantea siete estrategias de climatización, cuatro para enfriamiento y tres para calentamiento (figura 5.33):

- a. Ventilación diurna o nocturna (*VDN*), estrategia de enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se establece por encima y a la derecha de la zona de confort. Está delimitada por una línea punteada color azul que representa una velocidad de viento máxima de 2 m/s.
- b. Enfriamiento evaporativo directo e indirecto (*EEID*), estrategia de enfriamiento pasivo cuya área de oportunidad se indica a la derecha y abajo de la zona de confort. Está delimitada por una línea punteada de color verde.
- c. Masa térmica (*MT*), estrategia de enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la derecha de la zona de confort. Está delimitada por una línea punteada color marrón.

- d. Aire acondicionado (AA), única estrategia de enfriamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad está por encima y a la derecha de las estrategias a base de energías pasivas. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.
- e. Calentamiento solar ligero (S), estrategia de calentamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda de la zona de confort. Su factor de eficiencia se estima en 0.5 (adimensional). Está delimitada por una línea punteada amarilla que representa condiciones de ganancia solar simple.
- f. Calentamiento solar medio (S'), estrategia de calentamiento pasivo cuya área de oportunidad se encuentra a la izquierda del límite de calentamiento solar ligero. Su factor de eficiencia se estima en 0.7 (adimensional). Está delimitada por una línea punteada color naranja que representa condiciones de ganancia solar optimizada.
- g. Calefacción (H), única estrategia de calentamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad de extiende a la izquierda del límite de calentamiento solar medio. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.

Como en las otras cartas incluidas en este bloque, las líneas continuas de color gris representan las condiciones higrotérmicas de un día típico de cada mes y la serie de puntos amarillos indica las condiciones higrotérmicas horarias de un día típico de la temporada. La superposición de las condiciones promedio de la temporada (puntos amarillos) o de las condiciones de cada mes en particular (líneas grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican la conveniencia de aplicar la estrategia de climatización correspondiente. Abajo del gráfico se inserta la simbología de los indicadores utilizados así como las variables involucradas (figura 5.33).

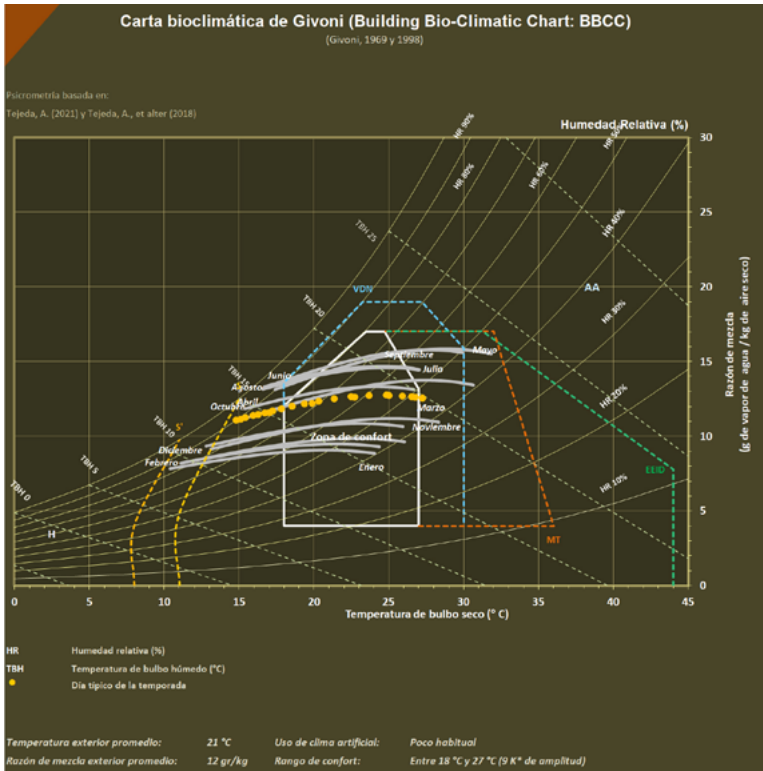


Figura 5.33. *Carta bioclimática de Givoni*
(*Building Bio-Climatic Chart: BBCC*) en la hoja 2.4.

La hoja 2.5 *Carta bioclimática de Szokolay* muestra la propuesta de Steve Szokolay conforme a los criterios establecidos en su publicación de 2008 (para mayor comprensión del trazado de esta carta se recomienda revisar los apartados 3.3.4 y 5.2.3.b de este libro). Su carta la desarrolla también sobre un diagrama psicrométrico, cuyas ordenadas corresponden a razón de mezcla (en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, g/kg); las abscisas representan temperatura de bulbo seco (temperatura ambiente, en °C); las líneas curvas constantes indican humedad relativa (HR en %) y las rectas de inclinación variable corresponden al índice de temperatura efectiva estándar (SET en °C). La zona

de confort, al centro de la carta, se delimita con líneas blancas (figura 5.34).

Szokolay incluye nueve estrategias de climatización, cinco para enfriamiento, tres para calentamiento y una útil para ambos requerimientos (figura 5.34):

- a. Ventilación diurna (VD), estrategia de enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se establece por encima y a la derecha de la zona de confort. Los tres estratos de velocidad de viento consignados se delimitan por medio de líneas punteadas color azul. La máxima velocidad de viento recomendada es de 1.5 m/s.
- b. Enfriamiento evaporativo directo (EED), estrategia de enfriamiento pasivo cuya área de oportunidad se extiende a la derecha y abajo de la zona de confort. Está delimitada por una línea punteada de color verde claro.
- c. Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI), estrategia de enfriamiento (puede ser pasiva o activa) cuya área de oportunidad se extiende arriba, a la derecha y abajo de la zona de confort por lo que se traslapa en cierta medida con la estrategia de EED, lo cual no debe entenderse como una recomendación de ambas estrategias actuando simultáneamente, sino como una recomendación indistinta (uno u otra). Está delimitada por una línea punteada de color verde oscuro.
- d. Masa térmica (MT), estrategia pasiva para amortiguar la oscilación térmica interior, cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda de la zona de confort (aplicable para demanda de calentamiento) y a la derecha de la misma (conveniente para demanda de enfriamiento). Está delimitada por una línea punteada color marrón. Cuando el área de oportunidad de MT se traslapa con otras estrategias, debe interpretarse como una recomendación para combinar sus efectos.

- e. Ventilación diurna con masa térmica (VD+MT), estrategia combinada para enfriamiento pasivo cuya zona de conveniencia se establece por encima y a la derecha de la zona de confort. Su traslape con las estrategias de enfriamiento evaporativo debe interpretarse como una recomendación para combinar sus efectos.
- f. Aire acondicionado (AA), estrategia de enfriamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad está por encima y a la derecha del resto de estrategias de enfriamiento. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.
- g. Ganancia solar pasiva sin aislamiento térmico (GS), estrategia de calentamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda de la zona de confort. Su factor de eficiencia se estima en 0.5 (adimensional). Está delimitada por una línea punteada amarilla que representa condiciones de ganancia solar simple y en una envolvente sin aislamiento térmico.
- h. Ganancia solar pasiva con aislamiento térmico (GS'), estrategia de calentamiento pasivo cuya área de oportunidad se encuentra a la izquierda del límite de ganancia solar ligera. Su factor de eficiencia se estima en 0.7 (adimensional). Está delimitada por una línea punteada color naranja que representa condiciones de ganancia solar optimizada y en una envolvente aislada térmicamente.
- i. Calefacción (H), única estrategia de calentamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad se extiende a la izquierda del límite de calentamiento solar medio. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.

Al igual que en las demás cartas incluidas en este bloque, las líneas continuas de color gris representan las condiciones higrotérmicas de un día típico de cada mes y la serie de puntos amarillos

indica las condiciones higrotérmicas horarias de un día típico de la temporada. La superposición de las condiciones promedio de la temporada (puntos amarillos) o de las condiciones de cada mes en particular (líneas grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican la conveniencia de aplicar la estrategia o la combinación de estrategias de climatización correspondiente. Abajo del gráfico se inserta la simbología de los indicadores utilizados y variables involucradas (figura 5.34).

Es pertinente advertir que el trazo de la carta de Szokolay sobredimensiona la importancia de la humedad en la sensación térmica, pues la considera dos veces. Primero, al optar por introducir los datos de temperatura en una regla del indicador de temperatura efectiva estándar (SET) que ya la lleva implícita y segundo al imponer límites higróscopos a la zona de confort (12 g/kg de razón de mezcla) así como a las estrategias de enfriamiento evaporativo y masa térmica (14 g/kg de razón de mezcla). Lo anterior tiene como resultado que la zona de confort queda exageradamente corta para la realidad de los climas húmedos y subhúmedos y demasiado restringida la oportunidad de emplear las estrategias de enfriamiento. Lo opuesto ocurre con la ganancia solar cuya estimación de oportunidad es mucho más amplia que las que estiman las otras cartas bioclimáticas. No obstante esas distorsiones, *bioclimarq* muestra la herramienta exactamente como la plantea su autor.

La hoja 2.6 *Triángulos de Confort de Evans* contiene una singular herramienta de diagnóstico bioclimático que ha desarrollado John Martin Evans desde finales del siglo pasado. La versión que incluye *bioclimarq* corresponde a su planteamiento de 2007. Se trata de un gráfico cartesiano cuya particularidad reside en que no incluye datos de humedad *per se*. No obstante ello, su efecto está claramente incorporado en la información de oscilación térmica (a mayor oscilación térmica menor presencia de humedad), con

lo que queda bien representada la sensación higrotérmica. Este gráfico integra el eje de las ordenadas (en K), mientras que el de las abscisas lo constituye la temperatura ambiente (en °C). Ambas variables se introducen en términos del valor promedio mensual y estacional (para mayor comprensión del trazado de esta carta se recomienda revisar los apartados 3.3.4 y 5.2.3.b de este libro). La zona de confort, al centro de la carta, tiene la forma de un triángulo truncado delimitado con líneas blancas (figura 5.35).

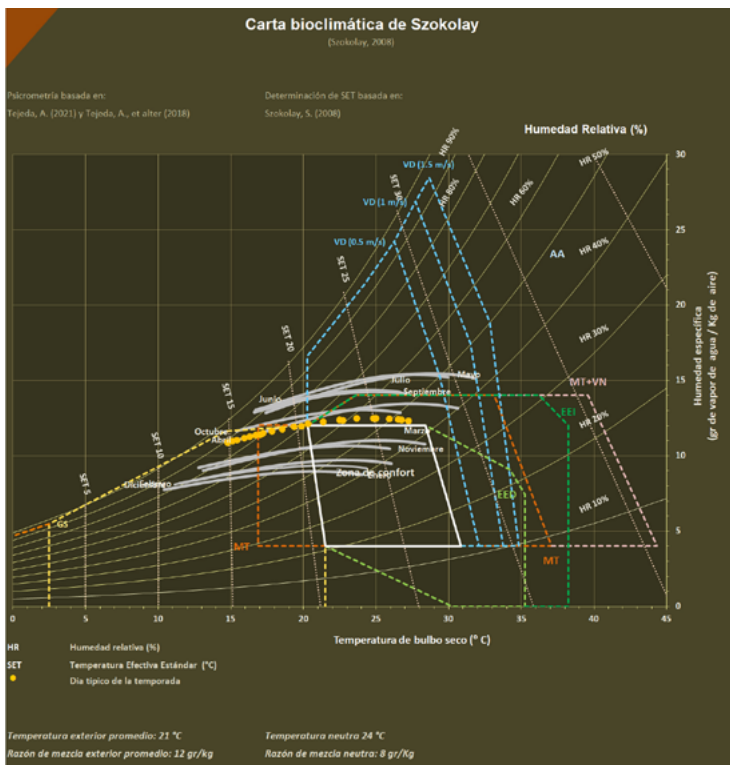


Figura 5.34. Carta bioclimática de Szokolay en la hoja 2.5.

Evans incluye nueve estrategias de climatización (algunas de las cuales en realidad son estrategias combinadas). Cuatro de ellas son propias para enfriamiento, cuatro para calentamiento y una útil para ambos requerimientos (figura 5.35):

- a. Ventilación (V), estrategia de enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se establece a la derecha de la zona de confort. Se delimita por medio de líneas punteadas color verde. Constituye un efecto subjetivo de enfriamiento sobre la piel, pues en términos físicos la temperatura del aire no experimenta cambios.
- b. Ventilación selectiva diurna más inercia térmica (VS-D+IT), combinación de estrategias para enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se establece por encima y a la izquierda de la zona de confort. Se delimita por medio de líneas punteadas color azul claro. Esta combinación de estrategias resulta especialmente útil para evitar el sobrecalentamiento en horas de mayor exposición al sol, incluso en condiciones de clima frío.
- c. Ventilación selectiva nocturna más inercia térmica (VS-N+IT), combinación de estrategias para enfriamiento pasivo cuya zona de oportunidad se establece por encima y a la derecha de la zona de confort. Se delimita por medio de líneas punteadas color azul medio. Esta combinación de estrategias es bastante útil para aprovechar el efecto de refrigeración que puede producir la temperatura del aire durante la noche en climas cálidos con cielos despejados.
- d. Aire acondicionado (AA), estrategia de enfriamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad se despliega a la derecha de los límites de las estrategias de ventilación y ventilación selectiva nocturna. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.
- e. Inercia térmica (IT), estrategia pasiva para amortiguar la oscilación térmica interior, cuya zona de oportunidad se encuentra por encima de la zona de confort (útil tanto para demandas de calentamiento como de enfriamiento). Está delimitada por líneas punteadas color rosa. Si el área de

oportunidad de IT se traslapa con otras estrategias, debe interpretarse como una recomendación para combinar sus efectos.

- f. Ganancias internas más inercia térmica (GI+IT), combinación de estrategias de calentamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda de la zona de confort. Las ganancias internas de calor se refieren a fuentes como aparatos eléctricos, de iluminación, estufas, chimeneas, e incluso personas, que con el apoyo de la inercia térmica de la envolvente, alargan el efecto de calentamiento. Está delimitada por una línea punteada color marrón. En caso de traslape con otras estrategias, debe interpretarse como una oportunidad de combinar sus efectos.
- g. Ganancias internas más inercia térmica con aislamiento térmico (GI+IT+A), combinación de estrategias de calentamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda del límite de las GI+IT. El aislamiento térmico de la envolvente hace aún más eficiente la combinación de GI+IT. Se delimita por una línea punteada color naranja. Al igual que el caso anterior, su traslape con otras estrategias debe interpretarse como una oportunidad de combinar sus efectos.
- h. Ganancia solar pasiva más inercia térmica (GS+IT), combinación de estrategias para calentamiento pasivo cuya zona de oportunidad se encuentra a la izquierda y por encima de la zona de confort. Está delimitada por una línea punteada amarilla. Su traslape con otras estrategias debe considerarse como oportunidad de sumar sus efectos.
- i. Calefacción (H), única estrategia de calentamiento a base de energía activa. Su área de oportunidad se extiende a la izquierda del límite de la GS+IT. Requiere que la envolvente arquitectónica esté aislada térmicamente.

En esta carta, los puntos de color gris representan las condiciones promedio de temperatura y oscilación térmica de cada mes, el punto amarillo indica las condiciones promedio de temperatura y oscilación térmica de la estación. La superposición de las condiciones promedio de la temporada (punto amarillo) o de las condiciones de cada mes en particular (puntos grises) sobre las zonas definidas en la carta, indican la conveniencia de aplicar la estrategia o la combinación de estrategias de climatización correspondiente. El efecto de tales estrategias debe interpretarse de la siguiente manera (figura 5.35):

- a. Cuando los puntos que representan las condiciones promedio quedan inscritos dentro de las áreas de enfriamiento, el efecto esperado es que las condiciones se desplacen por el eje de las abscisas hacia la izquierda de la carta (es decir, la temperatura disminuye), hasta quedar inscritas en la zona de confort o por encima de ella, en cuyo caso se requiere del efecto adicional de la inercia térmica.
- b. Cuando los puntos que representan las condiciones promedio quedan inscritos en las áreas de calentamiento, el efecto esperado es que las condiciones se desplacen por el eje de las abscisas hacia la derecha de la carta (es decir, la temperatura aumenta), hasta quedar inscritas en la zona de confort o por encima de ella, en cuyo caso se requiere del efecto adicional de la inercia térmica.
- c. Cuando los puntos que representan las condiciones promedio quedan inscritos en el área correspondiente a la inercia térmica, el efecto esperado es que las condiciones bajen por el eje de las ordenadas (es decir, la oscilación térmica disminuye), hasta quedar inscritas en la zona de confort.

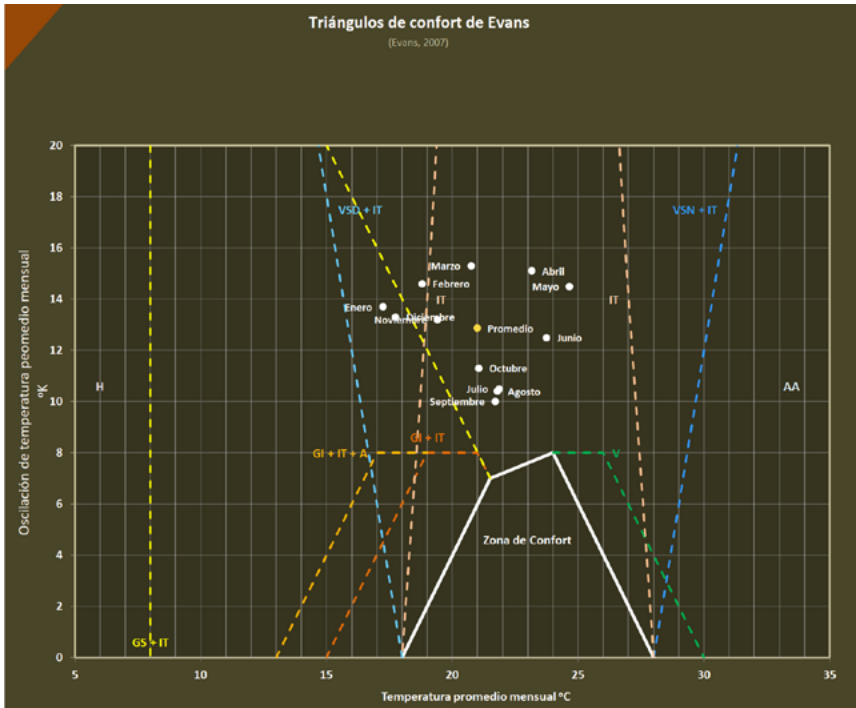


Figura 5.35. Triángulos de confort de Evans en la hoja 2.6.

La sección conclusiva del bloque 2 se sintetiza en la hoja 2.7 *Resumen del Diagnóstico Bioclimático*, que como todas las hojas de ese tipo está integrada por dos columnas (figura 5.36).

La columna a la izquierda de la hoja integra dos elementos básicos:

- a. Un resumen de información general integrado por tres cuadros: *Localización*, colocado en la parte superior izquierda, con los datos de localización geográfica (nombre del lugar, latitud, longitud y altitud); *Clima*, ubicado en la parte superior derecha, donde se resumen las características del clima local; y *Requerimientos de climatización*, localizado abajo del resumen del clima, con las demandas de climatización identificadas, que pueden ser de calentamiento, de

enfriamiento o mixto —cuando se requiere calentamiento nocturno y enfriamiento diurno en un mismo día— (figura 5.37); y

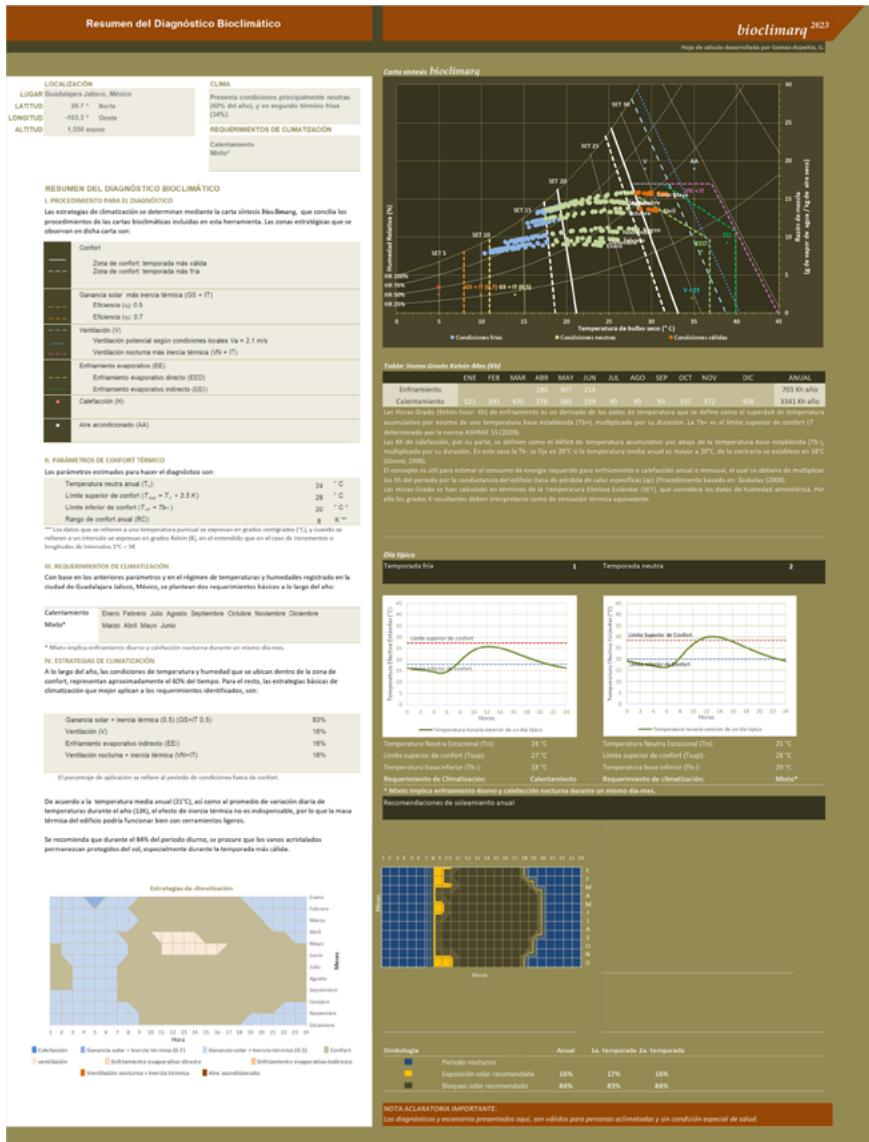


Figura 5.36. Hoja 2.7 Resumen del Diagnóstico Bioclimático.

LOCALIZACIÓN		CLIMA
LUGAR	Guadalajara Jalisco, México	Presenta condiciones principalmente neutras (60% del año), y en segundo término frías (34%).
LATITUD	20.7 ° Norte	
LONGITUD	-103.3 ° Oeste	
ALTITUD	1,550 msnm	REQUERIMIENTOS DE CLIMATIZACIÓN
		Calentamiento Mixto*

Figura 5.37. Resumen de información general en la hoja 2.7
Resumen del Diagnóstico Bioclimático

- b. El reporte que contiene el resumen ejecutivo del bloque, denominado *Resumen del Diagnóstico bioclimático*, que a su vez se compone de cuatro secciones:
- I. *Procedimientos para el diagnóstico*, en el que se explica que los resultados del bloque se determinan mediante las operaciones de *bioclimarq* que concilian los procedimientos de las cartas presentadas en las hojas 2.1 a 2.6 (para mayor claridad sobre estas operaciones se sugiere revisar los apartados 5.1.1 y 5.2 de este libro). La sección cierra con una tabla que contiene la simbología de las estrategias incorporadas a la carta síntesis de *bioclimarq* (figura 5.38).

—	Confort
— — —	Zona de confort: temporada más cálida
- - - -	Zona de confort: temporada más fría
— — — —	Ganancia solar más inercia térmica (GS + IT)
— — — —	Eficiencia (η): 0.5
— — — —	Eficiencia (η): 0.7
— — — —	Ventilación (V)
.....	Ventilación potencial según condiciones locales $V_a = 2.1$ m/s
— — — —	Ventilación nocturna más inercia térmica (VN + IT)
— — — —	Enfriamiento evaporativo (EE)
— — — —	Enfriamiento evaporativo directo (EED)
— — — —	Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)
■	Calefacción (H)
■	Aire acondicionado (AA)

Figura 5.38. Tabla con la simbología de las *estrategias de climatización* incluidas en la carta síntesis de *bioclimarq*, en la hoja 2.7
Resumen del diagnóstico bioclimático.

- II. *Parámetros de confort térmico*, donde se muestran los valores asignados a la temperatura neutra (en °C), los límites de confort (en °C) y el rango de confort (en K), asentados en la carta síntesis de *bioclimarq* (figura 5.39).

Temperatura neutra anual (T_n):	24	°C
Límite superior de confort ($T_{sup} = T_n + 3.5 K$)	28	°C
Límite inferior de confort ($T_{inf} = T_b -$)	20	°C *
Rango de confort anual (RC):	8	K **

Figura 5.39. Tabla con los *parámetros de confort térmico* asignados, en la hoja 2.7 *Resumen del diagnóstico bioclimático*.

- III. *Requerimientos de climatización*, donde se especifican las demandas de climatización identificadas, así como el periodo en que resulta conveniente su consideración —si hay más de una temporada incluye los meses en que ocurren— (figura 5.40).

Calentamiento	Enero	Febrero	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Mixto*	Marzo	Abril	Mayo	Junio				

Figura 5.40. Tabla con los *requerimientos de climatización* por temporada, en la hoja 2.7 *Resumen del diagnóstico bioclimático*

- IV. *Estrategias de climatización*, en el que se enumeran hasta cinco estrategias de climatización apropiadas para el clima local, incluyendo el porcentaje de tiempo que pueden resultar útiles (en función del periodo bajo condiciones fuera de confort) (figura 5.41).

Ganancia solar + inercia térmica (0.5) (GS+IT 0.5)	83%
Ventilación (V)	16%
Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)	16%
Ventilación nocturna + inercia térmica (VN+IT)	16%

Figura 5.41. Tabla con las *estrategias de climatización*, indicando el porcentaje de tiempo, respecto el periodo de condiciones fuera de confort, en que pueden ser útiles, en la hoja 2.7 *Resumen del diagnóstico bioclimático*.

Además de las estrategias incorporadas a la carta síntesis de *bioclimarq*, se aclara sobre la conveniencia complementaria del empleo de la inercia térmica y del uso de dispositivos de sombreado.

La sección cierra con un diagrama denominado *Estrategias de climatización*, construido en un gráfico de superficie cuyas ordenadas representan los meses del año, las abscisas expresan las horas del día y las cotas (cuyo eje no se muestra) corresponden a las estrategias aplicables al clima. Así, es posible reconocer a simple vista la oportunidad de aplicación de las principales estrategias identificadas a lo largo del año y según la hora del día (figura 5.42).

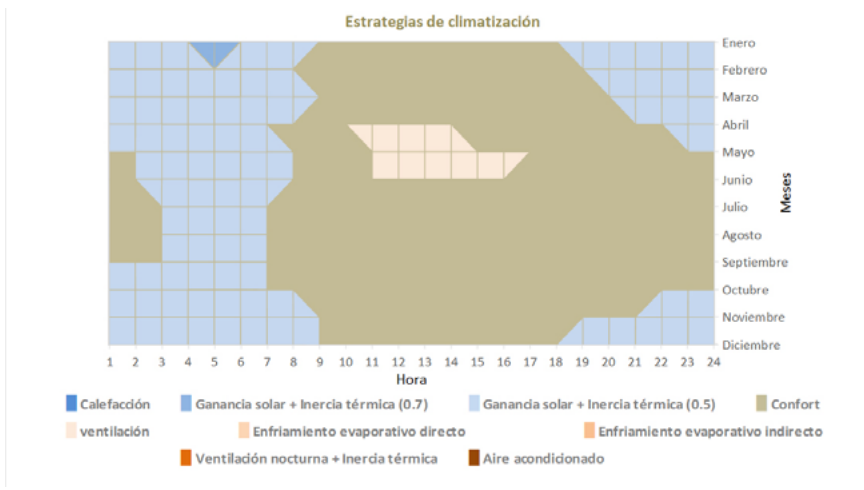


Figura 5.42. Gráfico de superficie que muestra las *estrategias de climatización* a lo largo del año, en la hoja 2.7 *Resumen del diagnóstico bioclimático*

La columna colocada en el margen derecho de la hoja contiene información que ayuda a complementar la información acerca del diagnóstico bioclimático elaborado. Su contenido se compone de cuatro secciones, a saber:

- a. *Carta síntesis de bioclimarq*, carta bioclimática que concilia los procedimientos y criterios de las seis cartas incluidas en

el bloque (hojas 2.1 a 2.6), y que sirve como herramienta de diagnóstico para establecer los requerimientos de climatización y las estrategias de climatización aplicables. Está construida sobre un diagrama psicrométrico cuyas ordenadas indican la razón de mezcla (en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, g/kg) y las abscisas representan la temperatura operativa (en °C). Las curvas continuas indican humedad relativa (en %) y las rectas de inclinación variable representan valores de *SET* (temperatura efectiva estándar, en °C). Los puntos insertados representan las condiciones higrotérmicas horarias de un día típico de cada mes. Su color indica la sensación térmica que implican. La simbología de colores se despliega abajo del gráfico: azul para condiciones frías, verde para condiciones neutras y rojo para condiciones cálidas. La zona de confort, al centro de la carta, se delimita con líneas blancas, continuas para temporada única o para la temporada más cálida y punteadas para la temporada más fría (figura 5.43). Los límites de las estrategias de climatización consideradas se muestran en la tabla incluida en el apartado I. del *Resumen del diagnóstico bioclimático* de la columna izquierda de la hoja (figura 5.38). La explicación detallada de los criterios usados para establecer los límites de aplicabilidad de la carta síntesis de *bioclimarq* se incluyen en el apartado 5.2.3.c de este libro.

- b. *Tabla Horas-Grado Kelvin-Mes (Kh)* que muestra la magnitud de las demandas de climatización expresadas en horas-grado por cada mes y el acumulado anual. La magnitud de las demandas de enfriamiento y calentamiento que muestra la tabla pueden dar una idea muy certera de qué tipo de estrategias deben incorporarse al diseño para lograr una habitabilidad térmica apropiada (figura 5.44). Debajo de la tabla

se incluye una breve exposición de cómo se determinan las horas-grado y cómo deben interpretarse para efecto de apoyo a las decisiones de diseño.

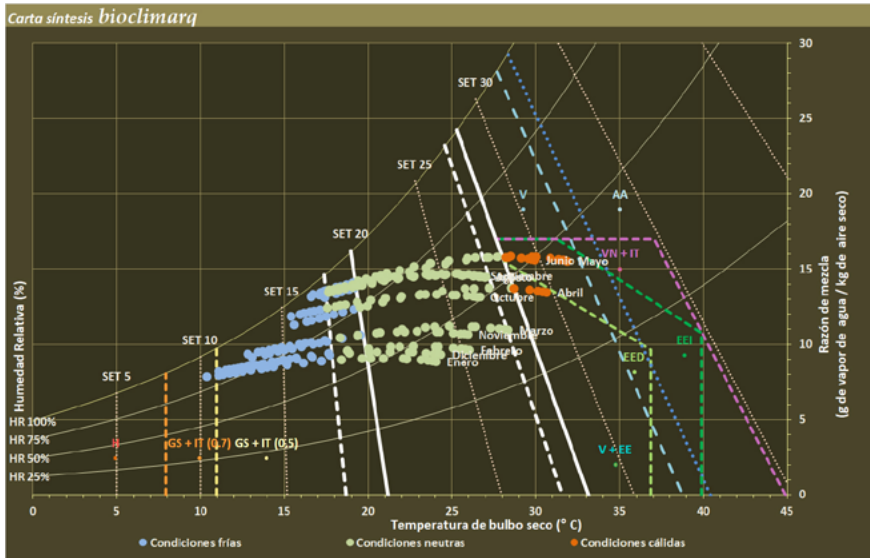


Figura 5.43. Carta síntesis de bioclimarq, en la hoja 2.7 Resumen del diagnóstico bioclimático.

Tabla: Horas-Grado Kelvin-Mes (Kh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Enfriamiento				180	307	214							701 Kh año
Calentamiento	521	392	470	276	165	159	95	95	91	197	372	508	3341 Kh año

Figura 5.44. Tabla de Horas-Grado Kelvin-Mes (Kh) de enfriamiento y calentamiento, en la hoja 2.7 Resumen del diagnóstico bioclimático

- c. *Día típico* en que se incluyen hasta tres gráficos (uno por cada temporada identificada) que muestran la trayectoria horaria de la temperatura exterior en un *día típico*. Cada gráfico está construido sobre un diagrama cartesiano cuyas ordenadas representan valores de temperatura en términos del índice SET (temperatura efectiva estándar, en °C) y las abscisas indica las horas del día. La curva resultante de la trayectoria de temperaturas horarias queda enmarcada por

los límites (superior e inferior) de confort estimados para la temporada, los cuales sirven de referente para apreciar los momentos del día en que pueden producirse sensaciones de frío o de calor, así como los periodos de sensación neutra. Debajo de cada gráfico se inserta un resumen que informa la magnitud de los parámetros empleados (temperatura neutra y límites superior e inferior de confort, en °C) así como el requerimiento de climatización predominante (figura 5.45). La utilidad de estos gráficos estriba en que se puede inferir de ellos qué puede ser más apropiado para el clima del lugar: incorporar estrategias para enfriar (como ventilación o enfriamiento evaporativo), para calentar (ganancia solar) o para reducir la amplitud u oscilación diaria de temperaturas (inercia térmica).

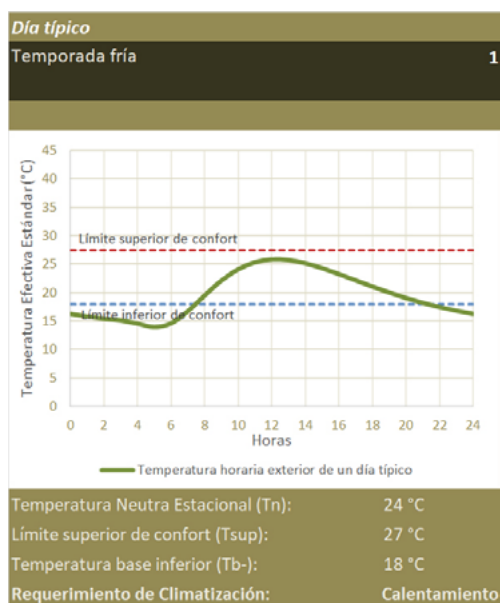


Figura 5.45. Gráfico que muestra la trayectoria horaria de la temperatura exterior de un *Día típico* por cada temporada identificada, en el marco del rango de confort correspondiente, en la hoja 2.7

Resumen del diagnóstico bioclimático.

- d. *Recomendaciones de soleamiento anual* plasmadas en un gráfico de superficie cuyas ordenadas indican los meses del año, las abscisas representan las horas del día y las cotas (cuyo eje no se muestra) corresponden a las recomendaciones relativas al soleamiento, que pueden ser dos: bloqueo mediante dispositivos de sombreado en periodos en los que la temperatura está dentro o por encima del rango de confort —marcados con color amarillo—; y exposición en periodos en que la temperatura se encuentra por abajo del rango de confort y haya presencia de radiación solar —señalados con color marrón—. Adicionalmente se identifican los periodos nocturnos (cuando no hay radiación solar) mediante color azul. Abajo del gráfico se incluye un resumen del porcentaje de tiempo en que son aplicables las recomendaciones (en función del tiempo que dura el periodo diurno, es decir excluyendo las horas del periodo nocturno), tanto para el periodo anual como por cada una de las temperaturas identificadas (figura 5.46).

Finalmente, en la parte inferior de la columna se destaca un aviso, en fondo rojo, donde se advierte que los diagnósticos y escenarios presentados en el bloque 2 *Diagnóstico bioclimático*, son válidos únicamente para personas aclimatadas y sin condición especial de salud, por lo que de presentarse cualquiera de esas condicionantes los diagnósticos mostrados podrían no ajustarse a la sensación térmica realmente percibida por esas personas (figura 5.36).

Bloque 3: Recomendaciones de Climatización

El objetivo de este módulo es proponer tácticas de climatización específicas de carácter arquitectónico y/o constructivo, a partir de los productos generados en los dos bloques previos, de tal manera que puedan ser incorporadas al proyecto desde sus esbozos iniciales. Para ello *bioclimarq* recurre a dos diferentes métodos

desarrollados para ayudar a decidir las formas arquitectónicas en función de su interrelación con el entorno higrotérmico que las condiciona.

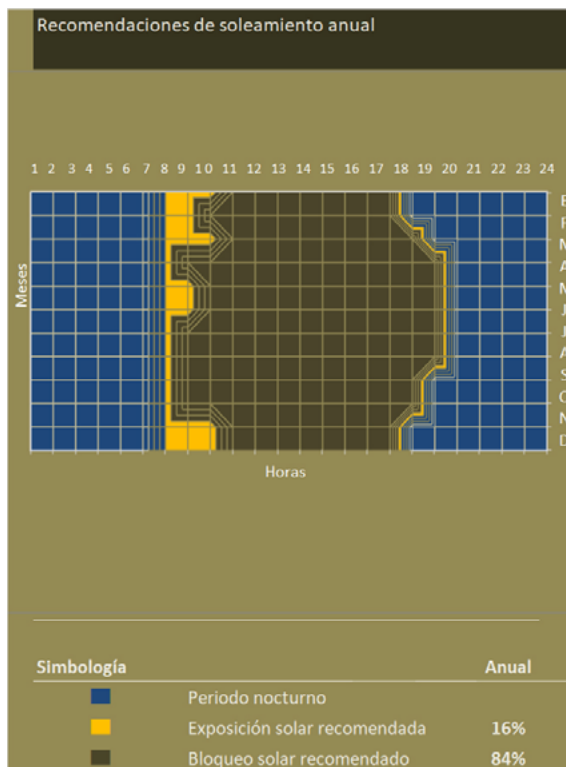


Figura 5.46. Gráfico de superficie que muestra las *recomendaciones de soleamiento anual*, en la hoja 2.7 *Resumen del diagnóstico bioclimático*.

La sección particular del bloque está constituida por dos hojas, cuya estructura está compuesta por dos segmentos (figura 5.46). El segmento situado a la izquierda contiene los siguientes componentes:

- La identificación de *bioclimarq*;
- Datos del desarrollador;
- Referencias bibliográficas que remiten a las fuentes de donde se ha extraído el método que se presenta en la hoja;

- d. Un cuadro de datos con la *localización geográfica* del lugar: nombre, latitud, longitud y altitud;
- e. Un cuadro de *variación estimada por ICU*, que reporta la magnitud con que se han modificado los datos de temperatura y humedad originalmente introducidos al programa, como efecto del fenómeno de isla de calor urbana (ICU) derivado, a su vez, de la localización del lote en la estructura urbana del lugar (temperatura en K y humedad relativa en %); y
- f. Un texto explicativo sobre el criterio de cuándo usar °C y cuándo K para dimensionar la temperatura.

Por su parte, el segmento ubicado a la derecha de la hoja se compone de diversas tablas que contienen la información acerca de los indicadores utilizados en cada proceso metodológico y las tácticas específicas que, como resultado del proceso, se identifican pertinentes (figura 5.47).

Tablas de Mahoney
(Koenigshofer, Mahoney and Evans, 1971)

Localización

LUGAR: Guadalajara, Jalisco, México
 LATITUD: 20.7 ° Norte
 LONGITUD: -103.3 ° Oeste
 ALTITUD: 1550 msnm

Variación estimada por ICU

Temperatura (ΔT_{ICU}): +3 K
 Humedad Relativa (Δ_{HR}): +1.8 %

Caracterización climática

El clima de Guadalajara Jalisco, México se caracteriza por:
 Temperatura por encima de los 20 °C y humedad relativa entre el 50% y el 70%, en promedio anual.
 Condiciones principalmente neutras (90% del año), y en segundo término frías (10%)

Diagnóstico bioclimático

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Claves
C	C	C	C	C	C	C	C					F
F	F	F	F						F	F	F	C

Estrategias recomendadas

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Temporalidad
				1	1							2 meses
					1	1	1	1				4 meses
1	1	1	1	1					1	1		7 meses
1	1				1	1	1	1	1	1		8 meses

Temas

Tácticas de bioclimatización recomendadas

- Orientación Norte-Sur, con eje largo Este-Oeste
- Configuración extendida pero protegida contra los vientos
- Habitaciones en doble galería que permita ventilación sólo ciertos periodos
- Paquetos: 15 - 25 % de la superficie de fachada
- A la altura de los ocupantes, frontales a la dirección de los vientos dominantes
- Favorables para optimizar el movimiento del aire al interior
- Protección contra la lluvia.
- Masivos, arriba de 8 hr de retraso térmico
- Masivos, arriba de 8 hr de retraso térmico
- Considerar drenes suficientes ante lluvias intensas

Figura 5.47 Hoja 3.1: *Tablas de Mahoney*. Muestra la estructura tipo de las hojas 3.1 y 3.2.

La hoja 3.1 *Tablas de Mahoney* despliega los productos obtenidos mediante la aplicación del método desarrollado por Carl Mahoney (para mayor detalle del método se recomienda revisar el apartado 4.5 de este libro), organizado en cuatro tablas dispuestas en el margen derecho de la hoja (figura 5.48):

- a. *Caracterización climática*, donde se resumen los atributos que caracterizan al clima del lugar en dos versiones: la que arroja el propio método de Mahoney y la obtenida a partir del análisis de la sensación higrotérmica que se procesó en el primer bloque de *bioclimarq.*
- b. *Diagnóstico bioclimático*, donde se muestran los resultados del diagnóstico para un día típico de cada mes, tanto en periodo diurno como nocturno, efectuado mediante el procedimiento de Mahoney. Las opciones resultantes permiten caracterizar al ambiente mensual como frío (F), cálido (C) o confortable (celda vacía).
- c. *Estrategias recomendadas*, donde se muestran las estrategias de climatización apropiadas para cada uno de los meses del año, especificando la temporalidad que abarca cada una de ellas. Las estrategias consideradas son: *ventilación esencial, ventilación deseable, protección contra la lluvia, inercia térmica, uso de espacio exterior como dormitorio, y protección contra el frío*
- d. La última tabla de la hoja se enfoca en las diversas *tácticas de bioclimatización recomendadas* para el clima del lugar, organizadas en diez temas, a saber: *configuración en planta, configuración espacial, distribución espacial para efectos de ventilación, tamaño de los vanos, aberturas en cerramientos interiores, protección de vanos, muros y pisos, cubiertas, y exteriores*. Estas recomendaciones constituyen el producto final del método de Mahoney, las cuales pueden servir de guía para los primeros trazos del proyecto.

Tablas de Mahoney														
(Koenigsberger, Mahoney and Evans, 1971)														
Caracterización climática		El clima de Guadalajara Jalisco, México se caracteriza por:												
Según Mahoney		Temperatura por encima de los 20 °C y humedad relativa entre el 50% y el 70%, en promedio anual.												
Según sensación ligro-térmica		Condiciones principalmente neutras (60% del año), y en segundo término frías (34%)												
Diagnóstico bioclimático		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Claves
Diurno				C	C	C	C	C						F
Nocturno		F	F	F	F							F	F	F
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> F Ambiente frío</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> C Ambiente cálido</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Ambiente confortable </div>												
Estrategias recomendadas		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Temporalidad
Ventilación esencial						1	1							2 meses
Ventilación deseable														
Protección contra la lluvia							1	1	1	1				4 meses
Inercia Térmica		1	1	1	1	1						1	1	7 meses
Espacio exterior como dormitorio														
Protección contra el frío		1	1						1	1	1	1	1	8 meses
Temas		Tácticas de bioclimatización recomendadas												
Configuración en planta		Orientación Norte-Sur, con eje largo Este-Oeste												
Configuración espacial		Configuración extendida pero protegida contra los vientos												
Distribución espacial para efectos de ventilación		Habitaciones en doble galería que permita ventilación sólo ciertos periodos												
Tamaño de los vanos		Pequeños: 15 - 25 % de la superficie de fachada												
Posición de los vanos		A la altura de los ocupantes; frontales a la dirección de los vientos dominantes												
Aberturas en cerramientos interiores		Favorables para optimizar el movimiento del aire al interior												
Protección de Vanos		Protegidos contra la lluvia.												
Muros y Pisos		Masivos, arriba de 8 hr de retraso térmico												
Cubiertas		Masivas, arriba de 8 hr de retraso térmico												
Exteriores		Considerar drenes suficientes ante lluvias intensas												

Figura 5.48. Indicadores y recomendaciones emanadas del método *tablas de Mahoney*, en la hoja 3.1.

La hoja 3.2 *Coefficientes de Serra y Coch* compendia los productos generados mediante la aplicación de los criterios que encarnan los coeficientes de forma y tratamiento de la piel de los edificios desarrollados por Rafael Serra y Helena Coch (para un mayor acercamiento a los coeficientes, sus criterios y sus procedimientos, se recomienda revisar el apartado 4.5 de este libro). El contenido, localizado al margen derecho de la hoja, se estructura en tres tablas (figura 5.49):

- a. *Caracterización climática*, donde se resumen los atributos que caracterizan al clima del lugar en dos versiones: la del método de Mahoney y la obtenida de los procedimientos propios de *bioclimarq*. Esta tabla es la misma que se muestra en el primer término de la hoja 3.1 *Tablas de Mahoney*.

- b. *Coefficientes de forma general del edificio*, tabla formada por dos columnas. En la primera —a la izquierda— se asientan los coeficientes de la categoría enunciada, considerados por *bioclimarq* (véase el apartado 4.5 de este libro): *compacidad* y *porosidad*. En la segunda —a la derecha— se establece el grado de intensidad recomendado para cada coeficiente así como las tácticas de bioclimatización que se derivan de ello.
- c. *Coefficientes de tratamiento de la piel del edificio*, tabla similar a la descrita en el punto anterior, en donde se registran los diez coeficientes de esta segunda categoría considerados por *bioclimarq* —en la columna de la izquierda—: *asentamiento*, *adosamiento*, *pesadez*, *perforación*, *transparencia*, *aislamiento*, *tersura*, *textura*, *color* y *variabilidad*. En la columna de la derecha se establece (al igual que lo descrito en el punto anterior) el grado de intensidad recomendado y las tácticas de bioclimatización correspondientes.

Coeficientes de Serra y Coch	
<small>(Serra y Coch, 1998)</small>	
Caracterización climática	El clima de Guadalajara Jalisco, México se caracteriza por:
Según Mahoney	Temperatura por encima de los 20 °C y humedad relativa entre el 50% y el 70%, en promedio anual.
Según sensación higro-térmica	Condiciones principalmente neutras (60% del año), y en segundo término frías (34%)
Coeficientes de forma general del edificio	Grado recomendado y tácticas de bioclimatización aplicables
Compacidad	Compacidad baja. Configuración espacial y volumétrica lineal.
Porosidad	Porosidad intermedia. Patios centrales pueden ser favorables.
Coeficientes de tratamiento de la piel	Grado recomendado y tácticas de bioclimatización aplicables
Asentamiento	Asentamiento intermedio. Espacios entresoldados que aseguren un mediano contacto con el subsuelo.
Adosamiento	Adosamiento intermedio. Cuando menos dos costados del edificio adosados a otro(s) edificio(s).
Pesadez	Pesadez intermedia. Cerramientos medianamente densos.
Perforación	Perforación intermedia. Vanos abiertos con una superficie entre 25% y 40% del área de fachada.
Transparencia	Transparencia intermedia. Un área acristalada mayor al 50% de la superficie de los vanos.
Aislamiento	Aislamiento intermedio. Aislamiento de la envolvente pero no en exceso.
Tersura	Tersura intermedia. Fachadas con algunos pliegues de hasta a 0.5 m. de saliente, que produzcan algo de sombra.
Textura	Textura intermedia. Superficies exteriores medianamente rugosas que permitan intercambio por convección.
Color	Color de intermedia absorptividad (α). Acabados de superficies exteriores a base de colores medios (0.5 ≤ α ≤ 0.7).
Variabilidad	Variabilidad baja. Arreglo de elementos y dispositivos con un mínimo de variabilidad según la época del año.

Figura 5.49. Indicadores y recomendaciones emanadas del método basado en los *coeficientes de Serra y Coch*, en la hoja 3.2.

Las tácticas de bioclimatización recomendadas en las dos últimas tablas de la hoja integran el producto final del método de-

rivado de los coeficientes de Serra y Coch, y son útiles como guía de diseño en los primeros trazos del proyecto.

NOTA ACLARATORIA: Las tácticas recomendadas en las hojas 3.1 y 3.2 se denominan de *bioclimatización* puesto que todas ellas operan mediante la aplicación de energías bajas y pasivas.

Dado que las recomendaciones de las hojas 3.1 y 3.2 se procesan bajo métodos y perspectivas distintas, pudieran presentarse contradicciones entre los resultados de un método y del otro. Por ello *bioclimarq* desarrolla un proceso de concertación para homologar los criterios de ambos métodos (para mayor detalle de las acciones ejecutadas en dicho proceso véase el apartado 5.1.3 de este libro). Los resultados de ello se presentan en la sección conclusiva del bloque 3, expuesta en la hoja 3.3 *Resumen de recomendaciones de climatización*. Su estructura, como todas las hojas de este tipo, se conforma por dos columnas (figura 5.50).

La columna ubicada en el margen izquierdo de la hoja incorpora dos elementos básicos:

- a. Un resumen de información general integrado por cuatro cuadros: *Localización*, colocado en la parte superior izquierda, con los datos de localización geográfica (nombre del lugar, latitud, longitud y altitud); *Clima*, ubicado en la parte superior derecha, donde se resumen las características del clima local; *Requerimientos de climatización*, localizado abajo del resumen de localización, con las demandas de climatización identificadas; y *Estrategias de climatización*, situado abajo del resumen de clima, que enuncia hasta cinco estrategias y su porcentaje de tiempo en que resultan útiles —tomando como base el periodo de tiempo fuera de confort— (figura 5.51); y

b. El reporte que contiene el resumen ejecutivo del bloque, denominado *Tácticas de bioclimatización recomendadas (figura 5.49)*, compuesto por tres secciones:

I. *Configuración espacial y volumétrica*, donde se plantean los criterios a considerar al momento de proyectar cuatro atributos fundamentales de la planta del edificio:

Implantación y distribución. Atañe a la definición de la huella del edificio sobre el terreno, así como al desarrollo y articulación de los espacios interiores entre sí.

Proximidad. Se refiere a la manera en que el edificio se integra al suelo y a los edificios colindantes.

Densidad. Corresponde a la consistencia física del edificio, ya sea ligera, media o pesada, lo cual repercute sensiblemente en la inercia térmica del mismo.

Adaptabilidad. Trata de las previsiones que se deben considerar para efecto de adaptar la respuesta del edificio a condiciones extremas, como lluvias torrenciales o temperaturas altas durante la noche en climas desérticos.

II. *Tratamiento de fachadas*, donde se precisan los criterios a observar en el proceso de diseño de los cerramientos exteriores respecto de tres atributos básicos:

Morfología, textura y color. Se refiere a terminados de fachada específicos tendientes a optimizar o reducir la ganancia solar según corresponda.

Tamaño, configuración y protección de vanos. Conciernen a cuestiones como la dimensión (relativa en función del área de fachada) y posición de los vanos de fachada (en función a la trayectoria del viento), así como a los dispositivos de protección que resultan pertinentes, ya sea para optimizar la ganancia solar (vidriado), reducirla (sombreado) o para evitar la exposición directa a las lluvias (alero). También abarca la conveniencia de practicar vanos de ventilación en los cerramientos interiores.

Variabilidad. Corresponde a disposiciones específicas en el diseño de los elementos de fachada, tanto en su consis-

tencia como en su posición o ubicación, que puedan variar con el fin de dar respuesta a condiciones diferentes según la temporada del año. Las variaciones pueden darse en la transparencia u opacidad de las superficies, las propiedades de conducción o aislamiento térmico de pigmentos o vidrios *inteligentes*, o la practicabilidad de cerramientos de tal manera que se puedan mover, voltear o eliminar temporalmente.

III. *Escenarios de cambio climático*, donde se *plantean* las previsiones que deben hacerse respecto de algunas estrategias de climatización, en virtud de los escenarios de cambio climático estimados para los horizontes de mediados y finales del siglo. Los impactos del cambio se cuantifican en términos de las horas-grado de enfriamiento y calentamiento esperables, según la tabla localizada en la parte inferior del lado derecho de la hoja (figura 5.52).

Horas-Grado Kelvin-Mes (Kh). Escenarios de cambio climático.												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Enfriamiento	0	0	0	180	307	214	0	0	0	0	0	0
Calentamiento	521	392	470	276	165	159	95	95	91	197	20	508
	701 Kh mes											
	2,989 Kh mes											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Enfriamiento	0	124	0	230	438	303	0	0	381	308	137	0
Calentamiento	537	386	206	0	0	0	0	0	0	129	354	514
	2050											
	1,921 Kh mes											
	2,127 Kh mes											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Enfriamiento	0	0	102	268	98	305	98	97	62	0	0	31
Calentamiento	435	291	198	0	0	0	0	0	0	0	231	422
	2100											
	1,061 Kh mes											
	1,377 Kh mes											

Figura 5.52. Tabla de *Horas-grado Kelvin-Mes (Kh)*. *Escenarios de cambio climático*, en la hoja 3.3 *Resumen de Recomendaciones de Climatización*

En la segunda columna —a la izquierda de la hoja—, además de la tabla de horas-grado de la figura 5.52, contiene un amplio apartado que incluye diez figuras demostrativas de los arreglos recomendados para efectos de bioclimatización referentes a los siguientes atributos de forma y piel del edificio (figura 5.53):

1. *Implantación*. Muestra las posibilidades de configuración de la planta, ya sea lineal, con patio central o compacta.
2. *Distribución*. Expone las alternativas de acomodo de los espacios interiores, ya sea en una o más galerías, con o sin patio central.

3. *Proximidad*. Indica las opciones de contacto entre el edificio y el subsuelo (*asentamiento*), así como con otros edificios (*adosamiento*).
4. *Densidad de cerramiento*. Expresa las alternativas de solidez de los materiales para aportar la inercia térmica más conveniente al clima local.
5. *Morfología superficial*. Muestra las distintas posibilidades de configuración de los cerramientos de fachada, ya sea plana, plegada, con salientes, o curva, en aras de ofrecer la mejor respuesta a la radiación solar incidente, ya sea para aprovecharla o bien para rechazarla.
6. *Textura superficial*. Plantea las diferentes opciones de terminado para los cerramientos de fachada, ya sea lisa o rugosa.
7. *Color de superficie exterior*. Propone las alternativas de luminosidad que conviene especificar para los colores de fachada, sean estos a partir de los colores propios del material aparente o del de recubrimiento, o bien a base de pigmentos, en el entendido que los colores claros reflejan más la radiación incidente que los colores oscuros.
8. *Tamaño de vanos*. Indica la proporción más apropiada de área de vanos respecto del área de fachada, en consideración de la conveniencia o no de aprovechar la ventilación natural.
9. *Protección de vanos*. Plantea el porcentaje de tiempo que conviene bloquear o permitir la radiación solar sobre vanos acristalados de conformidad con los requerimientos horarios de calentamiento o enfriamiento.
10. *Configuración de vanos (para inducir ventilación)*. Muestra dos esquemas de ventilación inducida capaces de generar efectos, ya sea de termosifón (*stack*) o bien *Venturi*. Cuando la ventilación no es una estrategia apropiada para el clima local, el espacio correspondiente a esta figura permanece vacío (figura 5.53 arriba)



Figura 5.53. Esquemas demostrativos de las recomendaciones de bioclimatización para dos climas diferentes. Arriba: de condiciones principalmente frías (55%) y en segundo término neutras (45%) (Ciudad de México), Abajo: de amplia oscilación térmica con mayor presencia de condiciones neutras (53%) (Colima, México)

La hoja concluye con una advertencia importante respecto de las tácticas de bioclimatización en el sentido de que se trata sólo de un compilado de recomendaciones genéricas, las cuales no deben ser tomadas de manera literal. El programa *bioclimarq*, como se dijo desde un principio, es un mero auxiliar en la toma de decisiones para el arranque de proyectos. Es una herramienta muy útil si se utiliza de manera reflexiva, pues considerar que sólo por aplicar la información se resuelve el proyecto de manera adecuada bioclimáticamente puede propiciar errores de diseño.

Si bien *bioclimarq* se ha elaborado para ser utilizarlo en la forma en que se ha descrito en esta guía, el uso y experiencia en su manejo permitirá encontrar nuevas formas de sacar el mejor provecho a esta herramienta de diseño bioclimático, teniendo en cuenta que la decisión final dependerá siempre del criterio, experiencia y conocimientos del proyectista.

Referencias

- ANSI/ASHRAE. (2019). Standard 62.2-2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ANSI/ASHRAE. (2021). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Transactions* (104), 145-167.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2000). *Solar engineering of thermal process*. Hoboken, New Jersey: John Wiley.
- Evans, J. (2004). e-Clim. *Análisis de clima y confort*. Buenos Aires, Argentina: CLHE Centro de Investigación Hábitat y Energía,

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. Obtenido de: <https://pdfcoffee.com/1-e-clim-clima-fadu-uba-5-pdf-free.html>

- Evans, J. (2007). *The Comfort Triangles: a new tool for bioclimatic design.* (PhD Thesis). Netherlands: Technische Universiteit Delft.
- Fanger, P. (1972). *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering.* New York: McGraw Hill.
- Fanger, P., & Toftum, J. (2002). Prediction of Thermal Sensation in Non-air-conditioned Buildings in Warm Climates. *Indoor Air 2002: Proceedings, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.* 1, págs. 92-97. Monterey: Indoor Air 2002.
- Fuentes Freixanet, V., & Rincón Martínez, J. (2016). Bioclimatic Analysis Tool (BAT) Aplicación informática para el análisis bioclimático en arquitectura. *Estudios de Arquitectura Bioclimática, XII, 27-53.* Obtenido de: https://www.academia.edu/33294697/Bioclimatic_Analysis_Tool_BAT_Aplicaci%C3%B3n_inform%C3%A1tica_para_el_an%C3%A1lisis_bioclim%C3%A1tico_en_Arquitectura
- Givoni, B. (June de 1965). Laboratory study of the effect of window size and location on indoor air motion. *Architectural Science Review, 8(2), 42-46.*
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture.* Amsterdam, New York: Elsevier.
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture.* Amsterdam - London - New York: Elsevier Publishing Company Limited.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design.* Canada: John Wiley & Sons Inc.

- González Cruz, E. (2019). CLIMANALISIS V1.1. *Análisis climático para diseño de edificaciones. Criterios y estrategias bioclimáticas*. Maracaibo, Venezuela. IFAD Universidad del Zulia.
- Glover, J., & McCulloch, J. (1958). The empirical relation between solar. Quarterly Journal of the Royal, 84, 172-175. temperatura interior
- Knox, J. A., Nevius, D. S., & Knox, P. N. (2017). Two simple and accurate approximations for wet-bulb temperature in moist conditions, with forecasting applications. Bulletin of the American Meteorological Society, 98, 1987-1906.
- Königsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., & Szokolay, S. (2013). Manual of Tropical Housing and Building (First e-edition ed.). Hyderabad, India: Universities Press. Obtenido de https://www.academia.edu/30105808/Manualoftropicalhousing_koenigsberger_150824122547_lva1_app
- Olgay, V. (1963). Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Olgay, V. (1998). Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili S.A.
- Olgay, V. (2015). Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton: Princeton University Press.
- Quirino , O. L. (2019). Validación y reformulación de los algoritmos e índices climáticos de *bioclimarq* (2016). [Tesis de licenciatura no publicada]: Universidad Veracruzana.
- Rehman, S., & Halawani, T. (1997). Global solar radiation estimation. Renewable, 12, 369-385.
- SARH. (1982). Normales Climatológicas. Periodo 1941-1970. México: DGSMN.

- SENER. (9 de agosto de 2011). Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones. Envoltante de edificios para uso habitacional. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y Energía Natural*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architectural Science. The basis of sustainable design*. Oxford, UK: Elsevier LTD.
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., & et al. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- Tejeda, A., & Rivas, D. (2003). El bioclima humano en urbes del sur de México para condiciones de duplicación de CO₂ atmosférico. *Investigaciones Geográficas. Bol. Inst. Geografía*, 51, 37-52.
- Tejeda, A., & Vargas, A. (1996). A correlation between visual observations and instrumental records of cloudiness in Mexico. *Geofísica Internacional*, 35, 421-424.
- Tejeda-Martínez, A. (1991). An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmosfera*, 4, 139-144.
- Tejeda-Martínez, A. (1994). On the evaluation of the wet bulb temperatures as function of dry bulb temperature and relative humidity. *Atmósfera*, 7, 179-184.
- Tejeda-Martínez, A., & Gómez-Azpeitia. (2015). *Prontuario solar de México. Colima (México): Universidad de Colima y Universidad Veracruzana.*

- Tejeda-Martínez, A., Conde-Álvarez, C., & Valencia-Treviso, L. (2008). Climate change scenarios of extreme temperatures and atmospheric humidity for Mexico. *Atmosfera*, 21(4), 357-372.
- Tejeda-Martínez, A., Méndez Pérez, I., Rodríguez, N., & Tejeda Zacarías, E. (2018). *La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Colima: Universidad de Colima. Obtenido de http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf

APÉNDICES

A.1 Variables, abreviaturas y símbolos utilizados

<i>Abreviaturas y Símbolos</i>	<i>Variables</i>	<i>Unidades</i>
A_D	Área de Du Bois o área superficial del cuerpo humano	m ²
a	Coefficiente en función de la velocidad del aire para el índice T_{op}	adimensional
ad	Coefficiente de adosamiento	adimensional
ai	Área de cada cerramiento del edificio	m ²
as	Coefficiente de asentamiento	adimensional
at	Área total del edificio	m ²
av	Superficie del área de ventanas frontales al sol	m ²
b	Efusividad o admisividad térmica	kJ ² /s·m ⁴ ·K ²
BS_a	Brillo solar astronómico	horas-día-mes
BS_f	Brillo solar efectivo	horas-día-mes
C_R	Intercambio de calor por radiación	kcal/h (W)
C_V	Intercambio de calor por convección	kcal/h (W)
C_{vb}	Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido	kcal/h (W)
co	Coefficiente de compacidad de Serra y Coch	adimensional
C_p	Calor específico (capacidad calorífica)	J/kgK
C_{p_v}	Calor específico volumétrico	kJ/m ³ K
C_{p_x}	Calor específico relativo al $C_{p_{agua}}$	adimensional
CET	Índice de Temperatura Efectiva Corregida	°C
clo	Índice de arropamiento	clo
d	Espesor de la capa de material	m
D	Difusividad térmica	m ² /s
Dd	Días despejados al mes	Número de días
Dm	Número de días del mes	Número de días

D_{mn}	Días medios nublados al mes	Número de días
e	Presión de vapor	hPa (mbar)
Ed	Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel	kcal/h (W)
E_{evap}	Tasa de enfriamiento por evaporación	cm ³ /K
E_{re}	Pérdidas de calor latente debidas a la respiración	kcal/h
e_s	Presión de vapor de saturación	hPa
$e_{s_{max}}$	Presión de vapor de saturación máxima	hPa
$e_{s_{med}}$	Presión de vapor saturación media	hPa
$e_{s_{min}}$	Presión de vapor saturación mínima	hPa
ESW	Pérdidas de calor debidas a la sudoración	kcal/h (W)
ET	Ecuación del tiempo	Min
ET^*	Índice de Nueva Temperatura Efectiva	°C
f_{am}	Factor de amortiguamiento térmico estándar	adimensional
f_e	Factor de expectativa de clima artificial para edificios libremente ventilados	adimensional
f_{ET}	Factor para la ecuación del tiempo	°
f_{GS}	Factor de eficiencia estandarizado para ganancias solares	m ² K/Wh
f_{IUC}	Factor de localización en la isla urbana de calor	adimensional
f_{sw}	Eficiencia de enfriamiento por sudoración	adimensional
Hb	Producción interna de calor	kcal/h (W)
h	estatura	M
H_R	Humedad relativa	%
HR_{hor}	Humedad relativa a una hora determinada	%
HR_{max}	Humedad relativa máxima	%
HR_{med}	Humedad relativa promedio	%
HR_{min}	Humedad relativa mínima	%
H_x	Índice Humidex	°C
IC_{max}	Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica	°C
IC_{med}	Intensidad media de temperatura de una isla atmosférica	°C
IMC	Índice de masa corporal	adimensional
TSI	Índice de estrés térmico (<i>Thermal Stress Index</i> por sus siglas en inglés)	kcal/h (W)

Kh	Horas-grado (Kelvin) de enfriamiento o calefacción	$K \cdot h$
L	Longitud geográfica	°
L'	Longitud del huso horario	°
Lo	Acumulación de calor en el cuerpo	kcal/h (W)
Lre	Pérdidas de calor por respiración seca	kcal/h (W)
M	Tasa metabólica basal	met
m	Masa total de la envolvente del edificio	kg
$m(\text{SET})$	Pendiente de la línea de SET en un diagrama psicrométrico	adimensional
N	Número de cambios de aire por hora	Número de veces
n_j	Día juliano, 1 para el 1 de enero y 365 para el 31 de diciembre	Número de día
P	Presión atmosférica	hPa
P_c	Población de una ciudad	habitantes
p	Peso	kg
po	Coefficiente de porosidad de Serra y Coch	adimensional
PPT	Precipitación pluvial total del mes	mm
pr	Coefficiente de perforación de Serra y Coch	adimensional
ps	Coefficiente de pesadez de Serra y Coch	kg/m ²
q	Humedad específica	g/kg
qt	Conductancia total del edificio	W/K
Q^*	Radiación neta atrapada en la interfaz superficie/atmósfera	W/m ²
qc	Flujo de calor en el edificio por conducción	W/K
Qe	Flujo de calor latente de evaporación	W/m ²
Q_{et}	Radiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre plano horizontal	W/m ²
Q_g	Radiación solar global sobre plano horizontal	W/m ²
Q_g'	Radiación diaria global sobre plano horizontal del mes más frío	W/m ²
Qh	Flujo de calor sensible turbulento	W/m ²
Qs	Calor almacenado en la superficie	W/m ²
qv	Flujo de calor en el edificio por ventilación	W/K
Rcb	Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido	kcal/h (W)

R	Resistencia térmica	$m^2 K/W$
r	Resistividad térmica	mK/W
RC	Rango de confort térmico	K
r_w	Razón de mezcla	g/kg
$r_{w\ hor}$	Razón de mezcla a una hora determinada	g/kg
$r_{w\ sup\ EE}$	Límite higrico para enfriamiento evaporativo indirecto	g/kg
S	Tasa de sudoración requerida para mantener el equilibrio térmico	$kcal/h (W)$
S_{ad}	Superficie adosada a otros edificios	m^2
S_{as}	Superficie asentada sobre el terreno	m^2
S_{de}	Superficie desarrollada en fachadas	m^2
S_e	Superficie de una esfera de volumen igual a la de un edificio	m^2
S_{en}	Factor de soleamiento efectivo	adimensional
S_{en}^*	Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de nublados típicos	adimensional
S_{en}'	Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de la precipitación	adimensional
$S_{en\ cc}$	Factor de alteración del soleamiento efectivo por cambio climático	adimensional
SET	Índice de Temperatura Efectiva Estándar	$^{\circ}C$
S_G	Superficie global de la piel que rodea el edificio	m^2
S_i	Superficie de cada uno de los cerramientos del edificio	m^2
S_{pp}	Superficie de las fachadas hacia los patios más el área en planta de los patios de un edificio	m^2
S_{pr}	Superficie total de perforaciones (vanos)	m^2
S_{py}	Superficie proyectada o sobresaliente de la fachada	m^2
S_v	Superficie vidriada del edificio	m^2
T	Temperatura ambiente; es igual a T_s Temperatura de bulbo seco	$^{\circ}C$
t	Tiempo transcurrido a partir de la hora del amanecer (tiempo solar)	horas
T_b	Temperatura base establecida	$^{\circ}C$
TC	Tiempo civil: minutos a sumar o restar a la hora solar verdadera	minutos
T_{comf}	Temperatura operativa de confort	$^{\circ}C$

T_d	Temperatura de punto de rocío	°C
TE	Índice de Temperatura Efectiva	°C
T_G	Temperatura de globo negro	°C
T_{hor}	Temperatura a una hora determinada	°C
T_i	Temperatura interior	°C
T_o	Temperatura exterior	°C
T_{inf}	Temperatura límite inferior de confort	°C
T_{infGS}	Límite térmico para ganancias solares	°C
T_{max}	Temperatura máxima	°C
T_{max_o}	Temperatura máxima exterior	°C
T_{med}	Temperatura media	°C
T_{min}	Temperatura mínima	°C
T_{min_o}	Temperatura mínima exterior	°C
T_{MR}	Temperatura media radiante	°C
T_n	Temperatura operativa neutra	°C
T_{op}	Índice de Temperatura Operativa	°C
tr	Coefficiente de transparencia de Serra y Coch	adimensional
T_s	Temperatura de bulbo seco; es igual a T Temperatura ambiente	°C
ts	Coefficiente de tersura de Serra y Coch	adimensional
TS	Amplitud u oscilación térmica	K
TS_i	Oscilación o amplitud térmica interior	K
TS_o	Oscilación o amplitud térmica exterior	K
T_{sup}	Temperatura límite superior de confort	°C
T_{supv}	Límite térmico para ventilación	°C
T_{supvn}	Límite térmico para ventilación nocturna	°C
T_{supEED}	Límite térmico para enfriamiento evaporativo directo	°C
T_{supEEI}	Límite térmico para enfriamiento evaporativo indirecto	°C
T_v	Horario de verano	minutos
T_w	Temperatura de bulbo húmedo	°C
$T_{w sup EE}$	Límite adiabático para enfriamiento evaporativo	°C

U	Transmitancia térmica, conductancia o coeficiente 'U'	W/m ² K
\bar{U}	Coficiente de aislamiento de Serra y Coch	W/m ² K
UA	Coficiente de transmitancia térmica de un edificio	W/K
U_i	Coficiente de transmitancia de cada cerramiento	W/m ² K
v	Velocidad del aire	m/s
va	Velocidad del aire exterior	m/s
V_{ep}	Volumen de una esfera de superficie igual a la suma de las superficies de todas las fachadas de los patios más la superficie de los patios	m ³
V_T	Volumen total de un edificio incluidos patios	m ³
V_O	Volumen del edificio	m ³
W	Tasa metabólica	met
Y	Admitancia térmica	W/m ² K
Y_t	Admitancia total de un edificio	W/K
Z	Elevación o altitud	msnm
α	Absortividad	Adimensional
δ	Reflectividad o albedo	Adimensional
δ_s	Declinación solar	°
ΔT_{IUC}	Incremento de temperatura por IUC según localización	K
ΔT_v	Rango de aplicabilidad de ventilación	K
ε	Emisividad	adimensional
η	Eficiencia del colector solar	adimensional
η_v	Eficiencia de ventilación por orientación eólica	adimensional
ρ	Densidad	kg/m ³
ρ_w	Humedad absoluta o densidad de vapor	g/m ³
φ	Latitud del sitio	°
φ	Retraso o desfase térmico	h
ω_i	Ángulo horario al amanecer	radianes; °
k	Conductividad térmica	W/mK
λ	Longitud de onda	Nm
ν	Frecuencia de onda	Hz
μ	Amortiguamiento o decremento térmico	adimensional

A.2 Siglas de entidades y conceptos citados

<i>Siglas</i>	<i>Entidades o conceptos</i>
A	Aislamiento térmico de la envolvente (estrategia de climatización)
AA	Aire acondicionado (estrategia de climatización)
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standard Institute por sus siglas en inglés)
ASHRAE	Sociedad Estadounidense de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers por sus siglas en inglés)
ASHVE	Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción y Ventilación American (American Society of Heating and Ventilating Engineers por sus siglas en inglés)
BBCC	Carta Bioclimática de Edificios de Givoni (Buildings Bio Climatic Chart por sus siglas en inglés)
BREEAM	Método de Evaluación Ambiental del Instituto de Investigación en Edificios (Building Research Establishment Environmental Assessment Method por sus siglas en inglés)
C	Clima de una ciudad
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
EDGE	Excelencia en Diseño para la Mayor Eficiencia (Excellence in Design for Greater Efficiencies por sus siglas en inglés)
ESIME	Red Nacional de Estaciones Sinópticas Meteorológicas
EE	Enfriamiento evaporativo (estrategia de climatización)
EED	Enfriamiento evaporativo directo (estrategia de climatización)
EEl	Enfriamiento evaporativo indirecto (estrategia de climatización)
EEID	Enfriamiento evaporativo directo e indirecto (estrategia de climatización)
Epw	Archivo de datos climáticos de EnergyPlus (EnergyPlus Weather Data Format)
REMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio o error estándar de estimación
G	Patrones meteorológicos de gran escala
GEI	Gases de efecto invernadero
GL	Geografía física local
GI	Ganancias internas (estrategia de climatización)
GS	Ganancia solar pasiva sin aislamiento térmico (estrategia de climatización)
GS'	Ganancia solar pasiva con aislamiento térmico (estrategia de climatización)
H	Calefacción (estrategia de climatización)

IUC	Isla urbana de calor
IMC	Índice de masa corporal
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, por sus siglas en inglés)
ISB	Sociedad Internacional de Bioclimatología y Biometeorología (International Society of Biometeorology por sus siglas en inglés)
ISO	Organización Internacional de Estandarización (International Organization for Standardization por sus siglas en inglés)
IT	Inercia térmica (estrategia de climatización)
Ln	Logaritmo natural
LEED	Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (Leadership in Energy and Environmental Design por sus siglas en inglés)
MT	Masa térmica (estrategia de climatización)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PMV	Voto medio predicho (Predicted Mean Vote por sus siglas en inglés)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PPD	Porcentaje predicho de insatisfechos (Predicted Percentage Dissatisfied por sus siglas en inglés)
RC	Requerimiento de climatización
RCP	Trayectorias representativas de concentración (Representative Concentration Pathways por sus siglas en inglés)
S	Calentamiento solar ligero (estrategia de climatización)
S'	Calentamiento solar medio (estrategia de climatización)
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways por sus siglas en inglés)
TMY	Archivo de años típicos meteorológicos (Typical Meteorological Year)
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
UR	Características de la urbanización
V	Ventilación (estrategia de climatización)
VD	Ventilación diurna (estrategia de climatización)
VDN	Ventilación diurna y nocturna (estrategia de climatización)
VN	Ventilación nocturna (estrategia de climatización)
VERDE	Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios
WMO	Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization por sus siglas en inglés).
ZC	Zona de confort

A.3 Unidades de medición, prefijos y equivalencias

Fenómenos físicos

<i>Fenómeno</i>	<i>Unidades de medición</i>	<i>Equivalencias</i>
Rotación terrestre	1 día =	360 grados sexagesimales
	1 hora =	15 grados sexagesimales
	1 minuto =	15' (minutos de arco)
	1 segundo =	15" (segundos de arco)
Presión	1 atmósfera (atm) =	760 mm de mercurio (mmHg).
	1 mmHg =	133.322 pascales (Pa)
	1 Pa =	0.00750062 mmHg
	1 hectopascal (hPa) =	1 milibar (mb)
	1 atm =	101325 Pa
	1 Pa =	0.01 hPa (o mb)
Energía	1 caloría (cal) =	4.184 joules (J)
	1 J =	0.239006 cal
	1 J / segundo =	1 watt (W)
	1 met =	60 W/m ²
Temperatura	Grados absolutos o Kelvin (K) =	273.15+ grados centígrados (°C)
	Incremento de 1 K =	Incremento de 1 °C
	Grados Fahrenheit (°F) =	(9/5) °C + 32
	°C =	5/9 (°F – 32)
Precipitación	1 milímetro (mm) =	1 litro en cada m ² (l/m ²)
	1 pulgadas (in) =	2.54 mm
Nubosidad	1 décima de cielo cubierto =	0.8 octas de cielo cubierto
	1 octa =	1.25 décimas
Rapidez del viento	1 m/s =	3.6 km/h
	1 km/h =	0.277778 m/s
	1 milla terrestre (mi) / hora (h) =	1.60934 km/h
	1 km/h =	0.621371 mi/h
	1 nudos (kt) =	1 millas náuticas (mi) /hora (h)
	1 kt =	0.514444 m/s
	1 kt =	1.852 km/h
1 m/s =	1.94384 kt	

Ángulos (dirección del viento)	1 grado sexagesimal =	0.0174533 radianes
	1 radián =	57.2958 grados sexagesimales
	1 grado centesimal =	0.9 grados sexagesimales
	1 grado sexagesimal =	1.1111 grados centesimales
	1 grado centesimal =	0.015708 radianes
	1 radián =	63.662 grados centesimales
Humedad absoluta	g/m ³	Gramos de vapor por unidad de volumen
Humedad específica	g/kg	Gramos de vapor por unidad de masa de aire
Razón de mezcla	g/kg	Gramos de vapor por unidad de masa de aire seco
Humedad relativa	%	$= \frac{\text{Humedad absoluta}}{\text{Humedad absoluta saturada}} \times 100$
	%	$= \frac{\text{Humedad específica}}{\text{Humedad específica saturada}} \times 100$
	%	$= \frac{\text{Razón de mezcla}}{\text{Razón de mezcla saturada}} \times 100$
	%	$= \frac{\text{Presión de vapor}}{\text{Presión de vapor de saturación}} \times 100$
Metabolismo	Met	58.2 W/m ²
Arropamiento	Clo	6.45 W/m ² K (transmitancia) 0.155 m ² K/W (resistencia)

Prefijos

Prefijo	Símbolo	Potencia de 10	Equivalencia
Giga	G	10 ⁹	1000000000
Mega	M	10 ⁶	1000000
Kilo	k	10 ³	1000
Hecto	h	10 ²	100
Deca	da	10 ¹	1
Deci	d	10 ⁻¹	0.1
Centi	c	10 ⁻²	0.01
Mili	m	10 ⁻³	0.001

Micro	μ	10^{-6}	0.000001
Nano	n	10^{-9}	0.000000001

Unidades del Sistema Internacional (SI)

<i>Magnitud</i>	<i>Unidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Equivalencia</i>
Longitud	Metro	m	
Masa	Kilogramo	kg	
Tiempo	Segundo	s	
Temperatura	Kelvin	K	
Densidad	Kilogramo por metro cúbico	kg/m ³	
Rapidez	Metro por segundo	m/s	
Fuerza	Newton	N	kg m/s ²
Presión	Pascal	Pa	N/m ²
Energía	Joule	J	N*m
Potencia	Watt	W	J/s
Irradiación	Langley	Ly	cal/cm ²

A.4 Ecuaciones citadas⁸⁷

EC. 2.1 Ecuación del tiempo (ET) representa los minutos (y fracción) que deben sumarse o restarse a la hora solar verdadera para obtener la hora del tiempo solar medio:

$$ET = 9.87 \operatorname{sen}(2f_{ET}) - 7.53 \cos(f_{ET}) - 1.5 \operatorname{sen}(f_{ET})$$

donde:

ET Ecuación del tiempo, en minutos

f_{ET} Factor para la ecuación del tiempo, en grados sexagesimales

EC. 2.2 Factor para la ecuación del tiempo en función del punto en que se encuentra el planeta en la eclíptica, según la fecha:

$$f_{ET} = 360 \frac{(n_j - 81)}{364}$$

donde:

f_{ET} Factor para la ecuación del tiempo, en $^{\circ}$

n_j Día juliano del año, 1 para el 1 de enero y 365 para el 31 de diciembre

EC. 2.2 Tiempo civil (TC) representa los minutos que se deben agregar o restar a la hora solar verdadera para obtener la hora civil de una zona determinada, en función del huso horario adoptado:

$$TC = -ET - 4(L' - L) + T_v$$

donde:

TC Tiempo civil, en min

ET Ecuación del tiempo, en min

L' Longitud del huso horario, en $^{\circ}$

L Longitud geográfica del sitio, en $^{\circ}$

T_v Horario de verano, en min

87. Las constantes de las ecuaciones tienen las unidades adecuadas para que el resultado de aplicar esa ecuación tenga las unidades correspondientes a la variable dependiente.

EC. 2.4 Presión atmosférica (P):

$$P = 1008.4 - 0.1020(Z)$$

donde:

P = Presión atmosférica, en hPa

Z = Elevación o altitud del sitio, en metros sobre el nivel del mar

EC. 2.5 Ecuación de Adem para estimar la presión de vapor de saturación (e_s), válida para el intervalo $-10\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$:

$$e_s = 6.115 + 0.421915T + 1.4206 \times 10^{(-2)}T^2 + 3.046 \times 10^{(-4)}T^3 + 3.2 \times 10^{(-6)}T^4$$

donde:

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa

T Temperatura ambiente, en °C

EC. 2.6 Ecuación de Steadman para estimar la presión de vapor de saturación (e_s), válida para el intervalo $-10\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$:

$$e_s = 6.46 + 0.555T + 7.1 \times 10^{(-4)}T^3$$

donde:

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa

T Temperatura ambiente, en °C

EC. 2.7 Ecuación de Tejeda-Martínez para estimar la presión de vapor de saturación (e_s), válida para el intervalo $-10\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$:

$$e_s = 6.63 + 0.458T + 4.6 \times 10^{(-3)}T^2 + 6.6 \times 10^{(-4)}T^3$$

donde:

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa

T Temperatura ambiente, en °C

EC. 2.8 Ecuación de Lowry y Lowry para estimar la presión de vapor de saturación (e_s), válida para el intervalo $5\text{ °C} \leq T \leq 35\text{ °C}$:

$$e_s = 8.51 + 0.037T^2$$

donde:

e_s Presión de vapor de saturación, en hPa
 T Temperatura ambiente, en °C

EC. 2.9 Temperatura de punto de rocío (T_d):

$$T_d = T - \left(\frac{100}{HR} \right) / 5$$

donde:

T Temperatura ambiente, en °C
 T_d Temperatura de punto de rocío, en °C
 HR Humedad relativa, en %

EC. 2.10 Humedad relativa (HR):

$$HR = 100 \frac{e}{e_s}$$

donde:

HR Humedad relativa, en %
 e Presión de vapor, en hPa
 e_s Presión de vapor de saturación, en hPa

EC. 2.11 Humedad específica (q):

$$q = 622 \frac{e}{P}$$

donde:

q Humedad específica, en gramos de vapor por unidad de masa de aire (g/kg)
 e Presión de vapor, en hPa
 P Presión atmosférica, en hPa

EC.2. 12 Razón de mezcla (r_w):

$$r_w = 622 \frac{e}{P - e}$$

donde:

- r_w Razón de mezcla, en gramos de vapor por unidad de masa de aire seco (g/kg)
- P Presión atmosférica, en hPa
- e Presión de vapor, en hPa

EC. 2.13 Humedad absoluta o densidad de vapor (ρ_w):

$$\rho_w = 217 \frac{e}{T}$$

donde:

- ρ_w Humedad absoluta, en gramos de vapor por unidad de volumen de aire (g/m³)
- e Presión de vapor, en hPa
- T Temperatura ambiente, °C

EC. 2.14 Temperatura de bulbo húmedo (T_w):

$$T_w = \frac{(T + T_d)}{2}$$

donde:

- T_w Temperatura de bulbo húmedo, en °C
 - T_d Temperatura de punto de rocío, en °C
 - T Temperatura ambiente, °C
-

EC. 3.1 Temperatura media radiante (T_{MR}) caso general:

$$T_{MR} = T_G (1 + 2.35\sqrt{v}) - 2.35(T_s \sqrt{v})$$

donde:

- T_{MR} Temperatura media radiante en °C
- T_G Temperatura de globo negro en °C
- v Velocidad del aire en m/s
- T_s Temperatura de bulbo seco o Temperatura ambiente en °C

EC. 3.2 Temperatura media radiante (T_{MR}) en caso de viento en calma:

$$T_{MR} = T_G$$

donde:

T_G Temperatura de globo negro en °C
condición:

$$v < 0.2 \text{ m/s}$$

EC. 3.3 Índice de masa corporal (IMC):

$$IMC = \frac{P}{h^2}$$

donde:

IMC Índice de masa corporal, adimensional
 p Peso, en kg
 h Estatura, en m

EC. 3.4 Área de Du Bois o área superficial del cuerpo (A_D):

$$A_D = 0.202(p^{0.425})h^{0.725}$$

donde:

p Peso, en kg
 h Estatura, en m

EC. 3.5 Índice de Temperatura Efectiva (TE), sensación térmica por efecto de la humedad, caso general:

$$TE = T_s - \left[0.4 (T_s - 10) \left(1 - \frac{HR}{100} \right) \right]$$

donde:

TE Temperatura efectiva en °C
 T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
 HR Humedad relativa, en %

EC. 3.6 Índice de Temperatura Efectiva Corregida (*TEC*), sensación térmica por efecto de la radiación y la humedad, en caso de viento en calma y arropamiento medio:

$$CET = \frac{(1.21T_G - 0.21T)}{1 + 0.029(T_G - T_w)}$$

donde:

CET Temperatura Efectiva Corregida en °C

T_G Temperatura de globo negro, en °C

T_w Temperatura de bulbo húmedo, en °C

T Temperatura ambiente

condiciones:

$$v \approx 0.1 \text{ m/s}$$

EC. 3.7 Índice de Temperatura Efectiva Corregida (*TEC*), sensación térmica por efecto de la radiación y la humedad, en caso de viento en calma y arropamiento ligero:

$$CET = \frac{(0.944T_G - 0.056T_w)}{1 + 0.022(T_G - T_w)}$$

donde:

CET Temperatura Efectiva Corregida en °C

T_G Temperatura de globo negro, en °C

T_w Temperatura de bulbo húmedo, en °C

condiciones:

$$v \approx 0.1 \text{ m/s}$$

$$clo = 0.5$$

EC. 3.9 Índice de Temperatura Operativa (T_{op}), sensación térmica por efecto de la radiación, caso general:

$$T_{op} = A(T_s) + (1 - A) T_{MR}$$

donde:

- T_{op} Temperatura operativa, en °C
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- T_{MR} Temperatura media radiante, en °C
- A Coeficiente en función de la velocidad del aire (ver tabla 3.2)

EC. 3.10 Índice de Temperatura Operativa (T_{op}) en caso de nula radiación:

$$T_{op} = T_s$$

donde:

- T_{op} Temperatura operativa, en °C
 - T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- condiciones:

$$T_{MR} \approx T_s$$

EC. 3.11 Índice de Temperatura Operativa (T_{op}) en caso de radiación mínima y viento en calma:

$$T_{op} = \frac{(T_s + T_{MR})}{2}$$

donde:

- T_{op} Temperatura operativa, en °C
 - T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
 - T_{MR} Temperatura media radiante, en °C
- condiciones:

$$T_{MR} - T_s < 4^\circ\text{C}$$
$$v < 0.2 \text{ m/s}$$

EC. 3.12 Índice Humidex (H_x), sensación térmica por efecto de la humedad:

$$H_x = T_s + \frac{5}{9}(e - 10)$$

donde:

- H_x Índice Humidex, en °C
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C
- e Presión de vapor, en hPa (mbar)

EC. 3.13 Presión de vapor de agua (e) en condiciones de no saturación⁸⁸:

$$e = 6.11 \cdot 5417.753 \left(\frac{1}{273.16} \right) \left(\frac{1}{273.16 + T_d} \right)$$

donde:

- e Presión de vapor, en hPa (mbar)
- T_d Temperatura de punto de rocío, en °C
- 5417.753 Constante basada en el peso molecular del agua, el calor latente de evaporación, y la constante universal de los gases

EC. 3.14 Temperatura de punto de rocío (T_d):

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} (112 + 0.9T_s) + (0.1T_s) - 112$$

donde:

- T_d Temperatura de punto de rocío, en °C
- HR Humedad relativa, en %
- T_s Temperatura de bulbo seco, en °C

EC. 3.15 Ecuación de confort de Fanger, que determina la acumulación de calor en el cuerpo (L_o):

$$L_o = Hb - Ed - Esw - Ere - Lre - Rcb - Cvb$$

88. Para calcular la presión de vapor e , en vez de la Ec. 3.13 se pueden usar las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 o 2.8, si en lugar de que la variable independiente sea la temperatura del aire, es la temperatura de punto de rocío. Otro procedimiento más sencillo para obtener e , es el siguiente: si se tienen datos de HR y T_s entonces con cualquiera de las ecuaciones 2.5 a 2.8 se obtiene la presión de vapor de saturación e_s y $e = (HR * e_s) / 100$; de esta manera se evita el cálculo de la T_d .

donde:

- Lo* Acumulación de calor en el cuerpo, en kcal/h⁸⁹
- Hb* Producción interna de calor, en kcal/h
- Ed* Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel, en kcal/h
- Esw* Pérdidas de calor debidas a la sudoración, en kcal/h
- Ere* Pérdidas de calor latente debidas a la respiración, en kcal/h
- Lre* Pérdidas de calor por respiración seca, en kcal/h
- Rcb* Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido, en kcal/h
- Cvb* Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido, en kcal/h

EC. 3.16 Voto Medio Predicho (*PMV*) en base a la tabla de Bedford (tabla 3.3):

$$PMV = (0.303 \exp^{-0.036M}) + 0.028)Lo$$

donde:

- PMV* Voto medio predicho, adimensional
- exp* Base del logaritmo natural = 2.1782
- M* Tasa Metabólica, en W/m²
- Lo* Acumulación de calor en el cuerpo, en W/m²

EC. 3.17 Porcentaje Predicho de Insatisfechos (*PPD*) en función del *PMV*:

$$PPD = 100 - 95 \exp^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)}$$

donde:

89.El calor acumulado se determina mediante un complicado cálculo iterativo que involucra las pérdidas y ganancias de calor del cuerpo por conducción, evaporación y radiación. El programa de cómputo que lo resuelve está disponible en el anexo D de la norma ISO 7730 (ISO, 2005b) y en el apéndice normativo B de la norma ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE, 2021).

- PPD* Porcentaje predicho de Insatisfechos
PMV Voto medio predicho, adimensional
exp Base del logaritmo natural = 2.7182

EC. 3.18 Temperatura operativa neutra (T_n) del estándar ASHRAE 55:

$$T_n = 0.31(\overline{T_o}) + 17.8$$

donde:

- T_n Temperatura operativa neutra, en °C
 $\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.19 Temperatura operativa de confort (T_{comf}) del estándar EN15251:

$$T_{comf} = 0.33(\overline{T_o}) + 18.8$$

donde:

- T_{comf} Temperatura operativa de confort, en °C
 $\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.20 Temperatura operativa neutra (T_n) estandarizada para México:

$$T_n = 0.51(\overline{T_o}) + 13.07$$

donde:

- T_n Temperatura operativa neutra, en °C
 $\overline{T_o}$ Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.21 Temperatura operativa límite superior de confort (T_{sup}) del estándar ASHRAE 55 para 80% de aceptación:

$$T_{sup} = 0.31(\overline{T_o}) + 21.3$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C
 \bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.22 Temperatura operativa límite inferior de confort (T_{inf}) del estándar ASHRAE 55 para 80% de aceptación:

$$T_{inf} = 0.31(\bar{T}_o) + 14.3$$

donde:

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C
 \bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.23 Temperatura operativa límite superior de confort (T_{sup}) del estándar EN15251 para categorías de edificios I, II o III:

$$T_{sup} = 0.33(\bar{T}_o) + 18.8 + 3$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C
 \bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.24 Temperatura operativa límite inferior de confort (T_{inf}) del estándar EN15251 para categorías de edificios I, II o III:

$$T_{inf} = 0.33(\bar{T}_o) + 18.8 - 3$$

donde:

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C
 \bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 3.25 Rango de confort térmico (RC) estandarizado para México en función de la oscilación térmica exterior promedio (\overline{TS}_o):

$$RC = 0.0088(\overline{TS}_o)^2 + 0.0899\overline{TS}_o + 3.584$$

donde:

RC Rango de confort, en K

\overline{TS}_o Oscilación térmica exterior promedio, en K

EC. 3.26 Oscilación o amplitud térmica exterior promedio (\overline{TS}_o):

$$TS_o = \overline{T_{max_o}} - \overline{T_{min_o}}$$

donde:

$\overline{T_{max_o}}$ Temperatura máxima exterior promedio, en °C

$\overline{T_{min_o}}$ Temperatura mínima exterior promedio, en °C

EC. 4.1 Coeficiente de compacidad de Serra y Coch (co):

$$co = \frac{S_e}{S_G} = 4.836 \left(\frac{V_T^{(2/3)}}{S_G} \right)$$

donde:

co Coeficiente de compacidad, adimensional

S_e Superficie de una esfera de volumen igual a la del edificio = $4.836(V_T^{2/3})$, en m^2

V_T Volumen total del edificio incluidos patios, en m^3

S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.2 Coeficiente de porosidad de Serra y Coch (po):

$$po = \frac{V_{ep}}{V_T} = 0.094 \left(\frac{S_{PP}^{(3/2)}}{V_T} \right)$$

donde:

po Coeficiente de porosidad, adimensional

- V_{ep} Volumen de patios = $0.094 (S_{PP}^{3/2})$, en m^3
 V_T Volumen total del edificio incluidos patios, en m^3
 S_{PP} Superficie de las fachadas de los patios más la superficie de los patios, en m^2

EC. 4.3 Coeficiente de asentamiento de Serra y Coch (as):

$$as = \frac{S_{as}}{S_G}$$

donde:

- as Coeficiente de asentamiento, adimensional
 S_{as} Superficie asentada sobre el terreno, en m^2
 S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.4 Coeficiente de adosamiento de Serra y Coch (ad):

$$ad = \frac{S_{ad}}{S_G}$$

donde:

- ad Coeficiente de adosamiento, adimensional
 S_{ad} Superficie adosada a otros edificios, en m^2
 S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.5 Coeficiente de pesadez de Serra y Coch (ps):

$$ps = \frac{m}{S_G}$$

donde:

- ps Coeficiente de pesadez, adimensional
 m Masa total de la envolvente del edificio, en kg
 S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.6 Coeficiente de perforación de Serra y Coch (pr):

$$pr = \frac{S_{pr}}{S_G}$$

donde:

- pr Coeficiente de perforación, adimensional
- S_{pr} Superficie total de perforaciones (vanos), en m^2
- S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.7 Coeficiente de transparencia de Serra y Coch (tr):

$$tr = \frac{S_v}{S_G}$$

donde:

- tr Coeficiente de transparencia, adimensional
- ps Coeficiente de perforación, adimensional
- S_v Superficie vidriada del edificio, en m^2
- S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.8 Coeficiente de aislamiento de Serra y Coch (\bar{U}):

$$\bar{U} = \frac{UA}{S_G}$$

donde:

- \bar{U} Coeficiente de aislamiento o transmitancia térmica media del edificio, en $(W/(m^2 K))$
- UA Coeficiente de transmitancia térmica del edificio, en W/K
- S_G Superficie global de la piel que rodea el edificio, en m^2

EC. 4.9 Coeficiente de transmitancia térmica de un edificio (UA):

$$UA = \sum_i S_i U_i$$

donde:

- UA Coeficiente de transmitancia térmica del edificio, en W/K
- S_i Superficie de cada uno de los cerramientos del edificio, en m^2

U_i Coeficiente de transmitancia de cada cerramiento, en $W/m^2 K$

EC. 4.10 Coeficiente de tersura de Serra y Coch (ts):

$$ts = \frac{S_{py}}{S_{de}}$$

donde:

ts Coeficiente de tersura, adimensional

S_{py} Superficie proyectada o sobresaliente de la fachada, en m^2

S_{de} Superficie desarrollada en fachadas, en m^2

EC. 4.11 Clima de una ciudad (C) ecuación conceptual:

$$C = G + GL + UR$$

donde:

C Clima de una ciudad

G Patrones meteorológicos de gran escala

GL Características de la geografía física local

UR Características de la urbanización

EC. 4.12 Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica (IC_{max}):

$$IC_{max} = 2\log_{10}P_c - 8$$

donde:

IC_{max} Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica, en K

P_c Población de una ciudad, en número de habitantes

EC. 4.13 Intensidad media de temperatura de una isla atmosférica (IC_{med}):

$$IC_{med} = \frac{IC_{max}}{4}$$

donde:

IC_{med} Intensidad media de temperatura de una isla atmosférica, en K

IC_{max} Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica, en K

EC. 4.14 Radiación neta atrapada en la interfaz superficie/atmósfera (Q^*):

$$Q^* = Qe + Qh + Qs$$

donde:

Q^* Radiación neta atrapada en la interfaz superficie/atmósfera, en W/m^2

Qe Flujo de calor latente de evaporación, en W/m^2

Qh Flujo de calor sensible turbulento, en W/m^2

Qs Calor almacenado en la superficie, en W/m^2

EC. 5.1 Presión de vapor de agua (e) en condiciones de no saturación:

$$e = 7.5 + 8.5 \times 10^{-2} T_{min} + 3.7 \times 10^{-2} T_{min}^2 - 1.710^{-3} T_{min}^3 + 1.9 \times 10^{-4} T_{min}^4 - 5.0 \times 10^{-6} T_{min}^5$$

donde:

e Presión de vapor de agua, en hPa

T_{min} Temperatura mínima, en °C

EC. 5.2 Humedad relativa media (HR_{med}):

$$HR_{med} = \frac{e}{e_{s\ med}} 100$$

donde:

HR_{med} Humedad relativa media, en %

e Presión de vapor, en hPa

$e_{s\ med}$ Presión de vapor de saturación media, en hPa (obtenido de la EC.2.7 despejada con T_{med})

EC. 5.3 Humedad relativa mínima (HR_{min}):

$$HR_{min} = \frac{e}{e_{s \max}} 100$$

donde:

HR_{min} Humedad relativa mínima, en %

e Presión de vapor, en hPa

$e_{s \max}$ Presión de vapor de saturación máxima, en hPa (obtenido de la EC.2.7 despejada con T_{max})

EC. 5.4 Humedad relativa máxima (HR_{max}):

$$HR_{max} = 2HR_{med} - HR_{min}$$

donde:

HR_{max} Humedad relativa máxima, en %

HR_{med} Humedad relativa media, en %

HR_{min} Humedad relativa mínima, en %

EC. 5.5 Ángulo horario al amanecer (ω_1):

$$\cos(\omega_{1 \ 15}) = -\tan(\varphi)\tan(\delta_{S_{15}})$$

donde:

$\omega_{1 \ (15)}$ Ángulo horario al amanecer del día 15 de un mes determinado, en °

φ latitud del sitio, en °

$\delta_{S_{15}}$ declinación solar del día 15 de un mes determinado, en °

EC. 5.6 Ángulo de declinación solar (δ_s):

$$\delta_s = \varepsilon_{ob} \operatorname{sen} \left[\frac{360 (284 + n_j)}{365} \right]$$

donde:

δ_s Declinación solar, en °

ε_{ob} Ángulo de oblicuidad de la eclíptica considerado como constante: 23.45°

n_j Día juliano del año: 1 corresponde al 1 de enero, 365 corresponde al 31 de diciembre.

EC. 5.7 Radiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal (Q_{et}):

$$Q_{et} = \left(\frac{24}{\pi} \right) Ic \left[(\cos(\varphi)\cos(\delta s)\text{sen}(\omega_1)) + (\omega_1 \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\delta s)) \right]$$

donde:

- Q_{et} Radiación extraterrestre al tope superior de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2 .
- Ic Constante solar = $1367 W/m^2$.
- φ Latitud del sitio, en $^\circ$
- δs Declinación solar, en $^\circ$
- ω_1 Ángulo horario al amanecer, en radianes.

EC. 5.8 Radiación diaria global sobre un plano horizontal (Q_g):

$$Q_g = Q_{et} \left[(0.29\cos(\varphi))(0.52(S_{en})) \right]$$

donde:

- Q_g Radiación diaria global sobre un plano horizontal, en W/m^2 .
- Q_{et} Radiación extraterrestre al tope de la atmósfera sobre un plano horizontal, en W/m^2 .
- φ Latitud del sitio, en $^\circ$
- S_{en} Factor de soleamiento efectivo por efecto de nublados típicos, adimensional

EC. 5.9 Factor de soleamiento efectivo (S_{en}):

$$S_{en} = \frac{BS_f}{BS_a}$$

donde:

- S_{en} Factor de soleamiento efectivo, adimensional
- BS_f Brillo solar efectivo, en horas-día-mes.
- BS_a Brillo solar astronómico, en horas-día-mes.

EC. 5.10 Brillo solar astronómico (BS_a):

$$BS_a = \frac{2}{15 \omega_1 (15)}$$

donde:

BS_a Brillo solar astronómico, en horas-día-mes.

$\omega_1 (15)$ Ángulo horario al amanecer del día 15 de un mes determinado, en $^\circ$

EC. 5.11 Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de nublados típicos, (S_{en}^*):

$$S_{en}^* = \left[0.31 + 0.48 \left(\frac{Dd + 0.5Dmn}{Dm} \right) BS_a \right]$$

donde:

S_{en}^* Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de nublados típicos, adimensional

Dd Número de días despejados al mes.

Dmn Número de días medio nublados al mes.

Dm Número de días de mes.

BS_a Brillo solar astronómico, número de horas diarias de sol (Ec. 5.10).

EC. 5.12 Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de la precipitación, (S_{en}'):

$$S_{en}' = -0.042 \ln(PPT) + 0.7098$$

donde:

S_{en}' Factor de soleamiento efectivo estimado a partir de la precipitación, adimensional

\ln Logaritmo natural.

PPT Precipitación pluvial total del mes, en mm.

EC. 5.13 Temperatura a una hora determinada, (T_{hor}):

$$T_{hor} = \bar{T}_{min} + (a t^b \exp^{ct}) (\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min})$$

donde:

- T_{hor} Temperatura a determinada hora, en °C
- \bar{T}_{min} Temperatura mínima promedio mensual, en °C
- \bar{T}_{max} Temperatura máxima promedio mensual, °C
- t Tiempo transcurrido a partir de la hora del amanecer (tiempo solar), en h
- exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Los parámetros a , b y c toman los valores de la tabla 5.4

Tabla 5.4. Valores de a , b y c , como función de la latitud y época del año.

Meses	Latitud ° N	a	b	c
Marzo-octubre	> 23.5	0.026	3.190	-0.375
Noviembre-febrero	> 23.5	0.023	3.436	-0.421
Enero-diciembre	< 23.5	0.096	2.422	-0.339

EC. 5.14 Humedad relativa a una hora determinada, (HR_{hor}):

$$HR_{hor} = \bar{HR}_{min} + (1 - a t^b exp^{ct}) (\bar{HR}_{max} - \bar{HR}_{min})$$

donde:

- HR_{hor} Humedad relativa a una hora determinada, en %
- \bar{HR}_{min} Humedad relativa mínima promedio mensual, en %
- \bar{HR}_{max} Humedad relativa máxima promedio mensual, en %
- t Tiempo transcurrido a partir de la hora del amanecer (tiempo solar), en h
- exp Base del logaritmo natural = 2.7182

Los parámetros a , b y c toman los valores de la tabla 5.4

EC. 5.15 Presión atmosférica, (P):

$$P = 1008.4 - 0.102(Z)$$

donde:

- P Presión atmosférica, en mm de Hg
- Z Altitud del sitio, en msnm

EC. 5.16 Temperatura de punto de rocío, (T_d):

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} \cdot [112 + (0.9T)] + (0.1T) - 112$$

donde:

T_d Temperatura de punto de rocío, en °C

HR Humedad relativa, en %

T Temperatura ambiente, en °C

EC. 5.17 Incremento de temperatura por IUC según localización, (ΔT_{IUC}):

$$\Delta T_{IUC} = IC_{max} \cdot f_{IUC}$$

donde:

ΔT_{IUC} Incremento de temperatura por IUC según localización, en K

IC_{max} Intensidad máxima de temperatura de una isla atmosférica, en K (Ec. 4.12)

f_{IUC} Factor de localización en la isla urbana de calor, conforme a la tabla 5.5:

Tabla 5.5. Valores de f_{IUC} en función de la localidad en la zona urbana.

Localización	f_{IUC}
En el centro de la ciudad	1
Entre el centro y la periferia	0.33
En la periferia o localidad rururbana	0

EC. 5.18 Factor de soleamiento efectivo modificado por cambio climático, ($S_{en CC}$):

$$S_{en CC} = S_{en} \cdot f_{sen CC}$$

donde:

$S_{en CC}$ Factor de soleamiento efectivo modificado por cambio climático, adimensional

- S_{en} Factor de soleamiento efectivo actual, adimensional
- $f_{sen\ CC}$ Factor de alteración del soleamiento efectivo por cambio climático, adimensional, conforme a la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Factor de alteración del soleamiento efectivo por cambio climático ($f_{sen\ CC}$)

Condición actual:	$S_{en} > 0.6$	$0.3 < S_{en} < 0.6$	$S_{en} < 0.3$	Unidad
$f_{sen\ CC}$	1.075	1.0	0.925	adimensional

EC. 5.19 Pendiente de las líneas SET en un diagrama psicrométrico, ($m(SET)$):

$$m(SET) = \frac{r_w}{\Delta SET}$$

donde:

$m(SET)$ Pendiente de la línea SET, adimensional

r_w Razón de mezcla, en g/kg

ΔSET Diferencia de temperatura a 0% de HR, respecto de T , en K

EC. 5.20 Diferencia de temperatura a 0% de HR, respecto de T , en un diagrama psicrométrico (ΔSET):

$$\Delta SET = T \times 0.023(T - 14)$$

donde:

ΔSET Diferencia de temperatura a 0% de HR, respecto de T , en K

T Temperatura ambiente, en °C

EC. 5.21 Temperatura operativa límite superior de confort para la carta bioclimática de Olgyay, cuando $\bar{T}_o < 20$ °C (T_{sup}):

$$T_{sup} = 0.31(\bar{T}_o) + 20.3$$

donde:

T_{sup} Temperatura operativa límite superior de confort, en °C

\bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 5.22 Temperatura operativa límite inferior de confort para la carta bioclimática de Olgyay, cuando $\bar{T}_o < 20$ °C (T_{inf}):

$$T_{inf} = 0.31(\bar{T}_o) + 15.3$$

donde:

T_{inf} Temperatura operativa límite inferior de confort, en °C

\bar{T}_o Temperatura promedio exterior (mensual o estacional), en °C

EC. 5.23 Temperatura límite superior de confort, para la BBCC de Givoni (T_{sup}):

$$T_{sup} = T_{inf} + RC$$

donde:

T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en °C

T_{inf} Temperatura límite inferior de confort, en °C:

Si $\bar{T}_o > 20$ °C entonces $T_{inf} = 20$ °C, si no, $T_{inf} = 18$ °C.

RC Rango de confort térmico, en K:

Si $\bar{T}_o > 20$ °C y las personas no están habituadas al aire acondicionado, entonces $RC = 9$ K, en todos los demás casos $RC = 7$ K.

EC. 5.24 Conductancia total del edificio (qt):

$$qt = q_c + q_v$$

donde:

qt Conductancia del edificio, en W/K

- q_c Flujo de calor en el edificio por conducción, en W/K
 q_v Flujo de calor en el edificio por ventilación, en W/K

EC. 5.25 Flujo de calor en el edificio por conducción (q_c):

$$q_c = \sum_i^n (a_i \times U_i)$$

donde:

- q_c Flujo de calor en el edificio por conducción, en W/K
 a_i Área de cada cerramiento del edificio, en m²:
 U_i Coeficiente de transmitancia “U” de cada cerramiento del edificio, en W/K

EC. 5.26 Flujo de calor en el edificio por ventilación (q_v):

$$q_v = \frac{(1200 \times N \times Vo)}{3600} = 0.33 \times N \times Vo$$

donde:

- q_v Flujo de calor en el edificio por ventilación, en W/K
1200 Capacidad calorífica volumétrica del aire húmedo, en J/m³ K
3600 Segundos en una hora
 N Número de cambios de aire por hora
 Vo Volumen del edificio, en m³
 $N \times Vo$ Tasa de ventilación, en m³/h

EC. 5.27 Límite térmico para ganancias solares ($T_{inf GS}$):

$$T_{inf GS} = T_{inf} - Q_g' f_{GS}$$

donde:

- $T_{inf GS}$ Límite térmico para ganancias solares, en °C
 T_{inf} Temperatura límite inferior de confort, en °C (SET)
 Q_g' Radiación diaria global sobre plano horizontal del mes más frío, en W/m² día.
 f_{GS} Factor de eficiencia estandarizado para ganancias solares, en m² K/Wh

EC. 5.28 Factor de eficiencia estandarizado para ganancias solares (f_{GS}):

$$f_{GS} = \frac{(av \times \eta)}{(24 qt)}$$

donde:

f_{GS} Factor de eficiencia estandarizado para ganancias solares, en $m^2 K/Wh$

av Superficie del área de ventanas frontales al sol, en m^2

η Eficiencia del colector solar:

$\eta_{0.5}$ Eficiencia hasta del 50% = 0.5

$\eta_{0.7}$ Eficiencia hasta del 70% = 0.7

24 Horas día

qt Conductancia del edificio, en W/K

EC. 5.29 Límite térmico para ventilación (T_{supv}):

$$T_{supv} = T_{sup} + \Delta T_v$$

donde:

T_{supv} Límite térmico para ventilación, en $^{\circ}C$ (SET)

T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en $^{\circ}C$ (SET)

ΔT_v Rango de aplicabilidad de ventilación, en K

EC. 5.30 Rango de aplicabilidad de ventilación (ΔT_v):

$$\Delta T_v = (6 \times va \times \eta_v) - (1.6 \times [va \times \eta_v]^2)$$

donde:

ΔT_v Rango de aplicabilidad de ventilación, en K

va Velocidad del aire exterior m/s

η_v eficiencia de ventilación por orientación eólica (45°) = 0.44

EC. 5.31 Límite térmico para ventilación nocturna ($T_{sup\ vn}$):

$$T_{sup\ vn} = T_{sup} + f_{am} (\overline{TS}_o)$$

donde:

$T_{sup\ vn}$ Límite térmico para ventilación nocturna, en °C (SET)

T_{sup} Temperatura límite superior de confort, en °C (SET)

f_{am} Factor de amortiguamiento térmico estándar, adimensional =0.5

\overline{TS}_o oscilación térmica promedio, en K

A.5 Ecuaciones, conversiones y constantes no incluidas en el texto

Ecuaciones

Concepto	Ecuación	Términos y unidades
Ley de Wien	$\lambda_{\max} = \frac{w}{T}$	λ_{\max} = longitud de onda (μm) w = constante de desplazamiento de Wien ($\mu\text{m K}$) T = temperatura (K)
Ley de Planck	$E_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} + \frac{1}{\exp(hc/kT\lambda) - 1}$	E_{λ} = Energía radiada (W) h = Constante de Planck (J/K) c = Velocidad de la luz (m/s) k = Constante de Boltzman (J/K) T = Temperatura (K) λ = Longitud de onda (nm)
Ley de Stefan-Boltzman	$E = \sigma T^4$	E = Energía radiante emitida (W/m ²) σ = Constante de Stefan-Boltzman (W/m ² K ⁴) T = Temperatura (K)
Ley de Kirchhoff	$\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$	ϵ_{λ} = Emisividad α_{λ} = Absortividad
Ley de los gases ideales (Ecuación de estado)	$P = \rho RT$	P = presión (N/m ²) ρ = densidad (kg/m ³) T = temperatura (K) R = constante universal de los gases ideales (J/kg*K)
Ecuación de Clausius-Clapeyron	$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \Delta V}$	$\frac{dp}{dT}$ = Pendiente de la curva que relaciona presión de vapor de saturación (hPa) en función de la temperatura (°C) L = calor latente o <i>entalpía</i> del cambio de fase (J/kg) T = Temperatura (°C) ΔV = Variación del volumen específico (m ³ /kg)

Conversiones

Concepto	Ecuación	Simbología
Grados Celsius a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$	$^{\circ}\text{F}$ = Grados Fahrenheit $^{\circ}\text{C}$ = Grados Celsius
Grados Fahrenheit a Celsius	$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{F} - 32$	$^{\circ}\text{F}$ = Grados Fahrenheit $^{\circ}\text{C}$ = Grados Celsius
Grados Celsius a Kelvin	$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$	$^{\circ}\text{C}$ = Grados Celsius K = Grados Kelvin

Constantes

Concepto	Símbolo	Valor
Ángulo de oblicuidad de la eclíptica	ε_{ob}	23.45° 23° 27'
Base del logaritmo natural	exp	2.7182
Cero absoluto (temperatura)		0 K -273.15 °C
Constante Solar	I_c	1376 W/m ² 1.97 cal/cm ² /min
Constante de desplazamiento de Wien	W'	2897 μm K 0.0028976 m·K
Constante de Planck	H	$6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s
Constante de Boltzman	K	1.380649×10^{-23} J/K
Constantes de reducción de la radiación solar por el cruce de la atmósfera y la nubosidad de Glover y McCulloch		0.29 y 0.52
Constante de Stefan-Boltzman	σ	$5.67037442 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴
Constante Universal de los gases ideales	R	287 J/kg·K
Relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro en geometría euclidiana	π	3.141592...
Velocidad de la luz al vacío	c	2.997×10^8 m/s

AGRADECIMIENTOS

Al doctor en Arquitectura y reconocido experto en el tema de este libro, Víctor Armando Fuentes Freixanet, del Departamento de Medio Ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, así como al doctor en Física Eduardo Herrera Aztegui, profesor visitante de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (UV), por la evaluación académica y revisión cuidadosa del manuscrito final de este libro.

A Leonardo Quirino Olvera, cuya tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas por la UV fue de gran ayuda para la elaboración de este libro y para la depuración de *bioclimarq*.

A Camilo Caicedo-Morales, doctorando de la Universidad de Colima, por la lectura del documento y sus valiosas sugerencias.

A Adrián Álvarez-Pérez (QED), Aranza Baruch-Vera, René Gómez-Díaz y Omar Castro-Díaz, de la Universidad Veracruzana, por el apoyo en la edición de figuras, tablas, ecuaciones y apéndices; Castro-Díaz hizo además una revisión exhaustiva del manuscrito.

A Elsa Viridiana Lucero Ruiz de la Escuela de Arquitectura y Diseño ISTHMUS, sede Chihuahua, México, por su apoyo en el procesamiento de las imágenes incorporadas al libro.

A la maestra Merced Lucía Meza Lerma por su colaboración en la aplicación piloto del software *bioclimarq*.

A los numerosos estudiantes y colegas que han usado *bioclimarq* a lo largo de los años, cuyas observaciones y sugerencias han propiciado el mejoramiento permanente del programa.

SOBRE LOS AUTORES

Gabriel Gómez-Azpeitia

Académico jubilado de la Universidad de Colima (México) 1983-2016 y profesor invitado de la Escuela de Arquitectura y Diseño para América Latina y El Caribe ISTHMUS (Panamá) desde 2001. Doctor en Arquitectura por la UNAM y maestro en Diseño Bioclimático por la Universidad de Colima. Ha sido profesor invitado de diversas universidades de México, Centro y Sudamérica y España. Su área de investigación incluye temas de confort térmico y dispositivos de enfriamiento pasivo en cubiertas. Ha desarrollado herramientas digitales sencillas para apoyo didáctico y aplicación profesional en temas de geometría solar y arquitectura bioclimática, una de ellas es *bioclimarq*, que da origen al presente libro. Es autor del libro “Habitar en el Trópico” (2012, Puertabierta Editores) y coautor del “Prontuario Solar de México” (2015, Universidad de Colima y Universidad Veracruzana) disponible en www.ucol.mx/publicacionesenlinea. Fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores (2001-2018).

Adalberto Tejeda-Martínez

Académico de la Universidad Veracruzana (México) desde 1985. Es doctor en Geografía y maestro en Geofísica por la UNAM. En climatología aplicada ha propuesto diversos modelos sencillos para estimar variables climatológicas, publicados en revistas científicas internacionales, varias de ellas retomadas en este libro. Es coautor, entre otros, de los libros “Guía para la elaboración de programas estatales de acción ante el cambio climático” (Instituto Nacional de Ecología, 2009), “Prontuario Solar de México”

(2015, Universidad de Colima y Universidad Veracruzana), “La humedad en la atmósfera” (2018, Universidad de Colima) y “La humedad atmosférica y los cambios climáticos...” (2023, Puertaabierta Editores). Coordinó la elaboración del Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (2005-2008),

Luis Carlos Herrera Sosa

Académico de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México) y profesor invitado de la Escuela de Arquitectura y Diseño para América Latina y El Caribe ISTHMUS (Panamá). Doctor en Arquitectura por la Universidad de Colima y Maestro en Arquitectura Bioclimática por ISTHMUS. Su área de investigación incluye temas relacionados con el ahorro de agua y energía en sistemas de enfriamiento evaporativo, análisis de materiales y diseño de viviendas bioclimáticas. Es autor y coautor de artículos en revistas científicas internacionales y memorias de congresos. Es coordinador del libro “Arquitectura pos·COVID·19 en México: reflexiones e investigación” (2021, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Universidad Autónoma de Chiapas) disponible en elibros.uacj.mx/omp/index.php/publicaciones. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

SOBRE ESTE LIBRO

La disciplina que articula los temas de este libro es la Bioclimática, cuyo propósito es la aplicación de conocimientos de Bioclimatología y Termodinámica a la arquitectura, a través de estrategias de ahorro energético en la climatización de edificios. Así, es posible apoyar los esfuerzos para enfrentar el cambio climático desde el ámbito del entorno construido y atenuar las condiciones térmicas cada vez más extremas producidas por ese fenómeno global. Una aportación original y práctica de este libro es *bioclimarq*²⁰²³, una herramienta digital descargable, que ayuda a los arquitectos a incorporar, desde la etapa de prediseño, los requisitos de confort térmico, así como las demandas futuras provocadas por el cambio climático.

ABOUT THIS BOOK

The discipline articulating the topics of this book is Bioclimatics, whose purpose is to apply knowledge of Bioclimatology and Thermodynamics to architecture's design, through energy saving strategies in buildings climatization. Thus, it is possible to support the efforts to face climate change from the scope of built environment and attenuate the increasingly extreme thermal conditions caused by that global phenomenon. An original and practical contribution of this book is *bioclimarq*²⁰²³, a downloadable digital tool, which helps architects to incorporate, from a pre-design state, thermal comfort requirements as well as future demands caused by climate change.