

Propuesta metodológica para el análisis de las afectaciones en la salud y confort térmico del ser humano debido al cambio climático en tres regiones de México

Methodological proposal for the analysis of the effects on human health and thermal comfort due to climate change in three regions of Mexico

Francisco Román González González^{1*}

¹Doctorante del Programa de Doctorado en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Tecamachalco, Instituto Politécnico Nacional, México.

*Autor de correspondencia

Resumen

Este trabajo pretende analizar los efectos del cambio climático en el confort térmico y la salud del ser humano en tres regiones bioclimáticas de México (semi frío, cálido seco y cálido húmedo). A través del *software* QGIS versión 3.2.3 fue posible extraer la base de datos del modelo de circulación general (MCG) CRNMCM5 y aplicarla a modelos de confort térmico. Se analizó el comportamiento de la zona de confort térmico en tres horizontes. Además, mediante la aplicación de un modelo de predicción de temperatura central se identificaron los periodos a futuro que representarán un riesgo para la salud. Los resultados presentan un comparativo para cada región y demuestran la viabilidad de la metodología propuesta, estableciendo que el clima cálido húmedo tendrá mayores afectaciones en el bienestar térmico y la salud del ser humano.

Palabras clave: Cambio climático; confort térmico; temperatura central.

Abstract

This paper aims to analyze the effects of climate change on thermal comfort and human health in three bioclimatic regions of Mexico (semi cold, hot dry, and warm humid). Through the QGIS software version 3.2.3 it was possible to extract the CRNMCM5 general circulation model (GCM) database and apply it to thermal comfort models. The thermal comfort zone behavior was analyzed in three horizons. In addition, future periods that will represent a health risk were identified through the application of a core temperature prediction model. The results show a comparison for each region and demonstrate the viability of the proposed methodology, establishing that a hot humid climate will have greater effects on thermal well-being and human health.

Keywords: Climate change; thermal comfort; core temperature.

Recibido: 26 de noviembre de 2020

Aceptado: 16 de abril de 2021

Publicado: 30 de junio de 2021

Como citar: González González, F. R. (2021). Propuesta metodológica para el análisis de las afectaciones en la salud y confort térmico del ser humano debido al cambio climático en tres regiones de México. *Acta Universitaria* 31, e3071. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2021.3071>

Introducción

En las últimas décadas se ha presentado un creciente interés por los efectos que el cambio climático tendrá en la vida de las personas. Este se define como el cambio de clima atribuido a la incidencia directa e indirecta de la actividad humana, resultando en la alteración de la composición de la atmósfera y facilitando el calentamiento global (Díaz, 2012). Este aumento global en la temperatura tendrá un impacto negativo en el clima local, por lo que se estiman afectaciones en la salud y confort térmico del ser humano en los próximos años. Por su parte, confort térmico ha sido definido por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 2016) como “aquel estado de la mente que expresa su satisfacción con el ambiente térmico”. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha alertado sobre las graves consecuencias que el cambio climático tendrá sobre la salud del ser humano, la economía, los ecosistemas y los climas regionales. Además, el IPCC ha identificado una disminución en el número de días fríos y un aumento en días calientes a escala global, lo que representará un mayor número de eventos de calor extremo a nivel mundial (Loughnan *et al.*, 2013).

Por tanto, este trabajo tiene como objetivo presentar una propuesta metodológica que permita, a través de escenarios climáticos, estimar el comportamiento de la zona de confort térmico (ZCT) a través de la interrelación de dos modelos conocidos como *Temperaturas horarias con un desfase complejo* y *Temperatura neutra*. Además, se analiza el impacto que tendrá el cambio climático en la temperatura central del ser humano, resultando en afectaciones a la salud, para lo cual se utiliza el modelo *The heat strain decision aid*. Así mismo, se han seleccionado tres regiones climáticas de la República Mexicana con el objetivo de validar el método propuesto.

El proceso de termorregulación del ser humano

El proceso de termorregulación es una función vital del sistema nervioso autónomo como respuesta al estrés por calor o frío (Cheshire, 2016). Su principal objetivo es mantener una temperatura constante en los principales órganos del cuerpo humano y el cerebro dentro de los parámetros establecidos. Para lograr esto, el cuerpo humano presenta diferencias entre la temperatura central (T_c) o temperatura de su núcleo, y la capa exterior del mismo (piel). La T_c es el predictor más confiable para medir el grado de agotamiento durante eventos de calor extremo (Richmond *et al.*, 2015). La diferencia de estas temperaturas varía de sujeto a sujeto, dependiendo de su condición física, pero esta se aproxima a los 37°C . La termorregulación se inicia como un proceso de defensa antes de que las condiciones ambientales puedan ocasionar un daño a la temperatura central.

Morrison & Nakamura (2011) mencionan que la regulación de la temperatura corporal es una de las innumerables funciones interrelacionadas esenciales para el mantenimiento de la homeostasis, las cuales se controlan principalmente a través de vías dedicadas en el cerebro. El término *homeostasis* se refiere a la tendencia de los organismos vivos a mantener una temperatura constante en su interior; por tanto, si el cuerpo no logra mantener la homeostasis de todas las variables, se interrumpe su función normal y existe la probabilidad de desarrollar una condición patológica (Lasakosvitsch, 2018).

Adicional a esto, Pop *et al.* (2018) mencionan que mantener la homeostasis del cuerpo es la función principal del hipotálamo. Este es una pequeña región ubicada en la parte central del cerebro, cerca del tálamo, formado por fibras nerviosas y un conglomerado de cuerpos nucleares con diversas funciones. Por tanto, el hipotálamo es responsable de sincronizar los diferentes elementos del cuerpo humano que están relacionados con el proceso de termorregulación como respuesta a la información recibida por medio de receptores de la piel y de los tejidos corporales profundos.

Kellogg (2006) establece que los receptores superficiales se pueden dividir en dos grupos: áreas lampiñas (palmas de las manos, pies y labios) y áreas con presencia de vello (extremidades, cabezas y tronco). En los primeros, las arteriolas cutáneas (vasos sanguíneos) están inervadas únicamente por los nervios vasoconstrictores, mientras que en los segundos están mediados por dos ramas del sistema nervioso simpático.

Por otra parte, Hall (2016) señala que el sistema termorregulador del ser humano se sirve de tres mecanismos para contrarrestar el estrés por calor. El primero es la disminución de actividad metabólica; el segundo es la vasodilatación, que multiplica la transferencia de calor a la piel hasta ocho veces; el tercero es el aumento de sudoración, que permite la pérdida de calor por evaporación a través de la piel y las membranas mucosas. Sin embargo, la capacidad de evaporación de la piel está en dependencia de las condiciones climáticas externas (por ejemplo, el contenido de vapor de agua en el aire).

El análisis exhaustivo de este proceso de termorregulación permite el desarrollo de diversos modelos, como los establecidos por Fanger, Givoni y Yaglou en la segunda mitad del siglo XX (González, 2013). Estos estiman la experiencia térmica del ser humano a partir de variables climáticas y características propias de la persona. Su nivel de aportación les ha permitido conservarse vigentes hasta la fecha y servir como punto de partida a estudios sobre confort térmico actuales (ASHRAE, 2016; Candido & de Dear, 2012).

Posibles afectaciones a la salud por exposición a incremento de temperatura como consecuencia del cambio climático

El incremento de olas de calor en la última década y establecimiento de temperaturas récord en países de Europa y América han permitido tener una aproximación a los posibles efectos del cambio climático en la temperatura global para los próximos años. El IPCC (2018) proyecta un incremento de 1.5 °C en la temperatura global entre los años 2030 y 2050. Esta proyección puede resultar en un incremento mayor en ciertas regiones climáticas debido a combinaciones particulares de los elementos del clima.

Es importante destacar que el ser humano tiene la habilidad de ajustar su temperatura corporal con el objetivo de adaptarse a diferentes ambientes térmicos que resultan de cambios climáticos o estacionales. La respuesta fisiológica del organismo durante la exposición al estrés por calor se conoce como aclimatación (Blasco, 2012). Sin embargo, dicha capacidad de adaptación está determinada por las características propias de la persona, como lo señalan Jendritzky & de Dear (2009), quienes establecen que la edad y condición física son factores primordiales estrechamente correlacionados, por lo que una baja condición física y un alto rango de edad representan una baja reserva cardiovascular, resultando en poca tolerancia térmica.

El proceso de termorregulación del ser humano hace posible que los incrementos de temperatura representen únicamente una afectación a su bienestar térmico y no se produzcan daños a la salud. Sin embargo, para asegurar de manera apropiada las funciones fisiológicas, Rintamäki (2006) señala que la temperatura central del ser humano (la cual tiene un valor de promedio de 37 °C) puede variar únicamente 4.5 °C, entre hipotermia (35.0 °C) e hipertermia (39.5 °C).

El incremento de la temperatura central puede ocasionar lo que se conoce como "golpe de calor", el cual está relacionado con la hipertemia. Esta se define como un aumento de la temperatura corporal por encima del punto de ajuste hipotalámico cuando los mecanismos de disipación de calor se ven afectados o superados por el calor externo/ambiental o interno/metabólico (Bouchama & Knochel, 2002, citados en Beker et al., 2018). En algunas ocasiones, presentar estos niveles de temperatura por algunos minutos puede ocasionar la muerte, ya que provoca una degeneración en las células de todo el cuerpo, la cual podría

ocasionar hemorragias locales (Hall, 2016). De manera específica, autores como Blasco (2012) y González-Alonso *et al.* (1999) han clasificado los valores de temperatura central que pueden poner en riesgo la vida del ser humano, determinando como riesgo ligero cuando se alcanza una temperatura de 38.1 °C, riesgo importante entre 38.1 °C y 39.4 °C y riesgo crítico por encima de 39.4 °C.

Las afectaciones en la salud debido al incremento de la temperatura central superior a 37 °C y por debajo de 40 °C se conocen como agotamiento por calor y pueden manifestarse por medio de vómitos, debilidad, confusión, fatiga, dolor de cabeza, disturbio visual, entre otros, lo cual puede requerir atención médica (Glazer, 2005). Por otra parte, el golpe de calor se presenta por temperaturas superiores a 40 °C y las principales afectaciones en la salud se manifiestan como arritmias cardíacas, edema pulmonar, falla hepática, trastorno del sistema nervioso, hiperventilación, convulsiones, shock e incluso la muerte (Beker *et al.*, 2018; Glazer, 2005; Gomez, 2007).

En los últimos años, diversos autores (Potter *et al.*, 2017; Richmond *et al.*, 2015) han desarrollado modelos que permiten estimar el incremento de la temperatura central a partir de condiciones ambientales y personales, con el propósito de prevenir afectaciones en la salud de grupos específicos (personal militar, brigadas de emergencia y atletas de alto rendimiento). Sin embargo, la posibilidad de manipular ciertas variables permite su implementación en grupos de estudio diferentes a los ya mencionados.

Materiales y Métodos

La base de datos utilizada corresponde al MCG CRNMCM5 (Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia), y fue descargada de la plataforma Atlas Climático (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>) de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), la cual permite obtener valores de temperatura (mínima, media y máxima) y precipitación mensual para la República Mexicana (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015). Estas capas climáticas fueron generadas a partir del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), proyectando datos de dos trayectorias de concentración representativas (RCP) (4.5 y 8.5), retomados por el IPCC (2014). El RCP 4.5 se plantea como un escenario intermedio que proyecta una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que inicia a mediados de siglo, alcanzando un nivel de estabilidad en el año 2100. Por otra parte, el RCP 8.5 representa un escenario catastrófico y estima que se mantenga la tendencia del incremento de emisiones al proyectarse una alta dependencia en los combustibles fósiles y un alto desarrollo de intensidad energética como resultado de un alto incremento en la población y una baja tasa de desarrollo tecnológico. Los tres horizontes estimados corresponden a 2015-2019, 2045-2069 y 2075-2099.

Por medio del *software* QGIS versión 3.2.3 fue posible obtener las capas climáticas para las coordenadas de las localidades en estudio. Adicional a esta información, se utilizaron los datos obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), que brinda datos de humedad relativa (HR) correspondientes al periodo 1981-2000, el cual se utiliza debido a la escasez de información para años posteriores. Es importante mencionar que los MCG proporcionan datos relevantes sobre proyecciones a futuro de temperatura y precipitación de una región geográfica de interés (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015). Por tanto, con el objetivo de calcular los valores de HR de cada horizonte proyectado, fue necesario desarrollar modelos matemáticos lineales para cada localidad de estudio. La generación de dichos modelos consistió en la aplicación de un análisis de regresión lineal simple entre los datos de precipitación acumulada mensual y humedad relativa media mensual actuales registrados por las estaciones meteorológicas de las localidades de estudio, las cuales presentaron un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.69$ (Tacubaya), $r^2 = 0.13$ (Monterrey) y $r^2 = 0.59$ (Acapulco). Asimismo, se presentó una correlación de Pearson entre los datos

observados (registrados por la estación meteorológica) y los reconstruidos (aplicación del modelo matemático lineal) de $r = 0.84$ (Tacubaya), $r = 0.37$ (Monterrey) y $r = 0.77$ (Acapulco). Por lo cual, acorde con esta buena asociación estadística entre la variable dependiente (humedad relativa media a futuro) y la variable independiente (precipitación a futuro), fue factible estimar los valores de HR a futuro (Montanero & Minuesa, 2018).

El modelo lineal generado para aplicarse a cada localidad es el siguiente:

$$hr = B_0 + B_1 * x$$

donde hr = humedad relativa media a futuro, el parámetro B_0 se deriva del análisis de regresión lineal simple, el parámetro B_1 se deriva del análisis de regresión lineal simple y x = cantidad de precipitación acumulada a futuro (mm). La tabla 1 muestra los valores utilizados en cada localidad.

Tabla 1. Valores utilizados en el modelo lineal para calcular HR según la localidad.

Localidad	Parámetro B_0	Parámetro B_1	Error típico del modelo
Tacubaya	48.1463	0.1423	2.3137
San Nicolás de los Garza	63.4810	0.0363	1.9080
Acapulco	73.7756	0.0111	0.4423

Fuente: Elaboración propia

El criterio de selección de las localidades de estudio estuvo basado en la agrupación bioclimática de ciudades propuesta por Fuente & Figueroa (1990) para la República Mexicana, la cual establece nueve bioclimas diferentes. Este estudio presenta el análisis para tres de estos, y la selección estuvo condicionada por el acceso a la información meteorológica requerida por los modelos aplicados. Sin embargo, se procuró presentar localidades con diferentes bioclimas. Estas fueron las siguientes:

1. Ciudad de México (Localidad: Tacubaya): Se encuentra a una altitud de 2308 m.s.n.m., con coordenadas 19.40361° N y 99.19611° O. Su precipitación pluvial anual es de 701 mm y su temperatura media del mes más caluroso es de 19.9 °C. Su clasificación bioclimática corresponde a semifrío.
2. Monterrey, N. L. (Localidad: San Nicolás de los Garza): Se encuentra a una altitud de 515 m.s.n.m., con coordenadas 25.73361° N, 100.30472° O. Su precipitación pluvial anual es de 545 mm y su temperatura media del mes más caluroso es de 28.6 °C. Su clasificación bioclimática corresponde a cálido seco.
3. Acapulco, Gro. (Localidad: Acapulco Diamante): Con una altitud de 3 m.s.n.m., con coordenadas 16.76306° N y 99.74889° O. Su precipitación pluvial anual es de 1465 mm y su temperatura media del mes más caluroso es de 28.8 °C. Su clasificación bioclimática corresponde a cálido húmedo.

El análisis del comportamiento de la ZCT en los diferentes horizontes se realizó mediante el modelo matemático temperaturas horarias con un desfase complejo (Neila, 2004), el cual permitió tener una estimación de las temperaturas horarias mensuales de una región específica a partir de los valores de temperatura máxima y mínima mensuales, por medio de la siguiente ecuación:

$$TH = \frac{(Tmax + Tmin)}{2} - \frac{(Tmax - Tmin)}{2} * Cos \frac{(Pi (hm - h))}{24 - (hM - hm)}$$

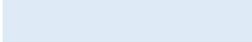
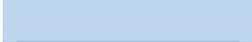
donde TH = Temperatura horaria; Tmax = Temperatura máxima mensual; Tmin = Temperatura mínima mensual; h = Hora del día en un intervalo de 0 a 24; hm = Hora mínima (6 h) y hM = Hora máxima (15 h).

Para tener una mejor comprensión de la ZCT, rango de temperatura en donde el ser humano experimenta bienestar térmico, se emplea la escala de sensación térmica propuesta por Rohles y Nevins (tabla 2) junto con el modelo de cálculo de temperatura neutra, o punto medio, desarrollado por Auliciems (González, 2013). La amplitud de la ZCT está basada en lo propuesto por Wakely¹, quien establece que esta depende de la oscilación media anual de temperatura de cada región:

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_m$$

donde Tn = Temperatura neutra y Tm = Temperatura media anual.

Tabla 2. Escala de sensación térmica para el ser humano propuesta por Rohles y Nevins.

Escala	Sensación térmica	Color asignado
5	Doloroso	
4	Muy caliente	
3	Caliente	
2	Cálido	
1	Ligeramente cálido	
0	Confort	
-1	Ligeramente fresco	
-2	Fresco	
-3	Frío	
-4	Muy Frío	

Fuente: Elaboración propia basado en González (2013).

Para conocer el impacto que tendrá el cambio climático en la salud de las personas se utilizó el modelo denominado *the strain decision aid* (HSDA), desarrollado por Potter *et al.* (2017). Este permite estimar el incremento de la temperatura central denominada temperatura central de equilibrio final (Tc_f) del ser humano como consecuencia de la temperatura ambiental y características particulares del sujeto. El HSDA se deriva del método de predicción de la temperatura corporal central de equilibrio, desarrollado por Givoni-Goldman, y toma en cuenta 16 variables divididas en cuatro grupos: antropometría/estado de salud, condiciones ambientales, características biofísicas del arropamiento y tasa metabólica (Potter *et al.*, 2017).

La tabla 3 describe la distribución de las variables del HSDA, así como el valor numérico utilizado para cada variable. Algunos de estos se proponen como variables controladas, siguiendo la recomendación del método; otros corresponden a los valores particulares del presente trabajo.

¹ Para una mayor comprensión de la amplitud de la zona de confort, según lo establecido por Patrick Wakely, revisar Tudela (1982).

Tabla 3. Distribución de variables del método HSDA para la predicción de la temperatura central del cuerpo humano.

Elemento	Símbolo	Descripción	Unidad	Valor numérico	Origen del valor numérico
Antropometría y estado de salud	Ht	Altura	Cm	170	Valor estándar para estudios de confort térmico
	Wt	Peso	Kg	70	Ídem.
	DIH	Días de aclimatación	Días	12	Según HSDA
	dhyd	Estado de deshidratación	%	1.24 - 2.5	1.24: meses frescos; 2.5: meses cálidos
	iTsk	Temperatura inicial de la piel	°C	33	Según HSDA
iTc	Temperatura central inicial	°C	36.8	Ídem.	
Condiciones ambientales	V	Velocidad del viento	m/s	0.4	Ídem.
	RH	Humedad relativa	%	-	Según valores de escenarios
	Ta	Temperatura ambiente	°C	-	Ídem.
	Tmr	Temperatura media radiante	°C	-	Igual a Ta
Características biofísicas del arropamiento	I _T	Resistencia térmica total	ND	0.5 - 1	0.5: meses cálidos; 1: meses frescos
	I _T V ^g	Resistencia térmica Coeficiente de velocidad del viento	ND	-0.22	Según HSDA
	I _m /clo	Potencial evaporativo	ND	0.5 - 1	0.5: meses frescos; 1: meses cálidos
	I _m /cloV ^g	Potencial evaporativo Coeficiente de velocidad del viento	ND	0.28	Según HSDA
Tasa metabólica	M	Producción de calor metabólico/Tasa metabólico	W	-	Según valores de actividad específica
	W _{ex}	Tasa de trabajo externo	W	20.46	Valor calculado para una persona de 70 Kg (+1Kg de ropa) caminando en un terreno de 2% de pendiente a 1.47 m/s

Fuente: Elaboración propia basado en Potter *et al.* (2017).

Potter *et al.* (2017) mencionan que, aunque el modelo fue desarrollado inicialmente como una herramienta de planeamiento militar, puede ser aplicado en escenarios diversos mediante la manipulación de las variables establecidas. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el valor de Tc_f se obtiene en un periodo entre 0 y 300 minutos (5 h) de trabajo constante, vestimenta utilizada y exposición a condiciones climáticas establecidas.

Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los diferentes modelos propuestos en este trabajo al aplicarlos en las bases de datos obtenidas por medio de la manipulación de las capas climáticas del modelo MCG CRNMCM5. Primeramente, se muestra la estimación del incremento de temperatura de las tres regiones en los diferentes horizontes y permite visualizar el comportamiento de la temperatura media anual según el bioclima. Segundo, se presenta el comportamiento de las temperaturas horarias en los horizontes propuestos junto a la escala de sensación térmica. Por último, se establece el incremento de temperatura central estimado para cada mes de los horizontes propuestos según el RCP.

Incremento de la temperatura media anual en las regiones de estudio

Las capas obtenidas de la plataforma Atlas Climático (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>), permitieron estimar el incremento de la temperatura media promedio anual para las regiones en estudio en los horizontes establecidos para los RCP 4.5 y 8.5 obtenido a partir del MCG CRNMCM5. La figura 1 presenta los mapas climáticos de Tacubaya en donde se muestra un incremento máximo de temperatura (horizonte 2075-2099) de 1.97 °C en RCP 4.5 y 3.61 °C en RCP 8.5. Sin embargo, es importante subrayar que en el RCP 8.5 el horizonte 2045-2069 presenta una temperatura mayor que la estimada para el horizonte 2075-2099 en el RCP 4.5. El incremento mínimo estimado para el horizonte 2075-2099 es de 1.46 °C (RCP 4.5) y 3.09 °C (RCP 8.5).

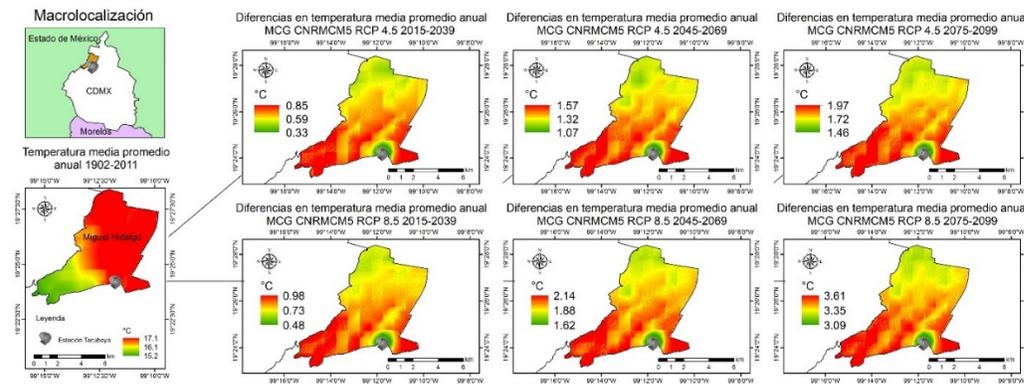


Figura 1. Temperatura media anual promedio para Tacubaya en los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 2 presenta los mapas climáticos de San Nicolás de los Garza en donde se muestra un incremento máximo de temperatura (horizonte 2075-2099) de 2.14 °C en RCP 4.5 y 4.0 °C en RCP 8.5. El incremento mínimo proyectado para el mismo horizonte es de 1.91 °C (RCP 4.5) y 3.78 °C (RCP 8.5). Al promediar los valores máximos y mínimos del horizonte 2075-2099 en cada RCP se encuentra que son similares, con una variación máxima de 0.3 °C. Por tanto, se espera un incremento homogéneo en toda la región de estudio.

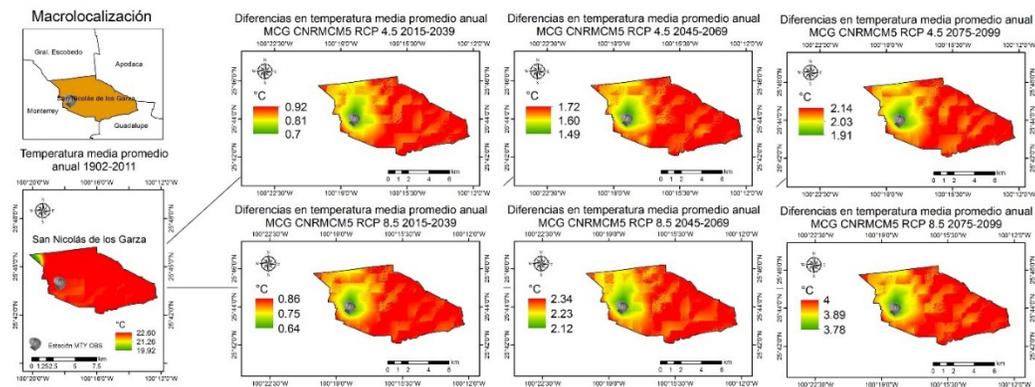


Figura 2. Temperatura media anual promedio para San Nicolás de los Garza en los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 3 presenta los mapas climáticos de Acapulco Diamante, en donde se muestra un incremento máximo de temperatura (horizonte 2075-2099) de 2.4 °C en RCP 4.5 y 3.85 °C en RCP 8.5. El incremento mínimo proyectado para el mismo horizonte será de 1.62 °C (RCP 4.5) y 3.01 °C (RCP 8.5). La diferencia de temperatura máxima y mínima en ambos escenarios será de 1 °C aproximadamente; sin embargo, se espera que el horizonte 2045-2069 del RCP 8.5 presente mayor temperatura que la máxima proyectada para el RCP 4.5.

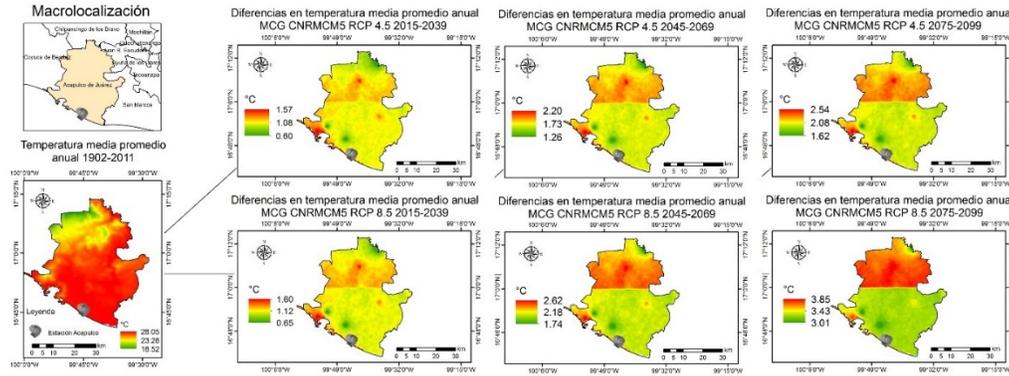


Figura 3. Temperatura media anual promedio para Acapulco Diamante en los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

Sensación térmica del ser humano según el comportamiento de las temperaturas horarias

El modelo de temperaturas horarias combinado con la escala de sensación térmica muestra un recurso gráfico que permite analizar el comportamiento del umbral de confort térmico del ser humano. De esta manera, es posible identificar, de manera general, los periodos del año en que se presentan las mayores temperaturas y, de manera específica, las horas del día que están fuera de la ZCT establecida para cada región de estudio. La región de Tacubaya, expuesta en la figura 4, muestra que se prevé una disminución de los horarios de confort a lo largo de los RCP. Para el horizonte 2015-2039 se proyectan tres meses, con una sensación térmica "cálido" según la escala utilizada, y esta cantidad se mantiene en los horizontes del RCP 4.5. Sin embargo, para el horizonte 2075-2099 del RCP 8.5, esta sensación se extiende durante siete meses, tres de estos dentro de la sensación "caliente".

The figure consists of 12 tables arranged in a 4x3 grid. The columns represent different climate scenarios: RCP 4.5 2015-2039, RCP 4.5 2045-2069, RCP 4.5 2075-2099, RCP 8.5 2015-2039, RCP 8.5 2045-2069, and RCP 8.5 2075-2099. Each table contains 12 columns for months (Ene, Feb, Mar, Abr, May, Jun, Jul, Ago, Sep, Oct, Nov, Dic) and 24 rows for hours of the day (1 to 24). The data represents hourly temperatures and a sensation scale. Values in bold indicate specific sensation levels, such as 'muy caliente' or 'doloroso'.

Figura 4. Temperaturas horarias y escala de sensación térmica de Tabuaya para los RCP 4.5 y 8.5 en lo horizontes establecidos.
Fuente: Elaboración propia.

Para la región de San Nicolás de los Garza se estiman ocho meses fuera de la ZCF para el primer horizonte, con una sensación térmica máxima denominada “muy caliente” en el mes de julio. De acuerdo con la figura 5, se proyecta una ZCT constante en los meses con mayores temperaturas. Sin embargo, para el último horizonte del RCP 8.5 se estima que el mes de julio tendrá sensaciones térmicas dentro del rango “doloroso”. Adicional a esto, los meses de mayo, agosto y septiembre experimentarán una sensación térmica de “muy caliente”.

The figure consists of three tables, each representing a different Representative Concentration Pathway (RCP) scenario. Each table contains 12 columns for the months of the year (Ene to Dic) and 24 rows for the hours of the day (1:00 to 24:00). The data points represent hourly temperatures and thermal sensation scales. The tables are arranged in a 3x3 grid. The top row shows RCP 4.5 2015-2039, the middle row shows RCP 4.5 2045-2069, and the bottom row shows RCP 8.5 2075-2099. The data indicates a significant increase in both temperature and thermal sensation over time and across scenarios, with the RCP 8.5 scenario showing the most extreme conditions.

Figura 5. Temperaturas horarias y escala de sensación térmica de San Nicolás de los Garza para los RCP 4.5 y 8.5 en los horizontes establecidos.
Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de las regiones ya mencionadas, en Acapulco Diamante se estiman temperaturas superiores a la ZCT en todos los meses del año y en la mayoría de las horas del día. Sin embargo, es importante destacar que la relevancia de las temperaturas reside en el aumento de meses con sensación térmica "muy caliente", los cuales pasan de tres (en el primer horizonte) a 12 (último horizonte RCP 8.5), según se muestra en la figura 6.

The figure consists of 12 tables arranged in a 4x3 grid. The first two columns represent RCP 4.5 scenarios, and the last two columns represent RCP 8.5 scenarios. The rows represent the years 2015-2039. Each table contains 12 columns for the months (Ene, Feb, Mar, Abr, May, Jun, Jul, Ago, Sep, Oct, Nov, Dic) and multiple rows of hourly data. The data is color-coded: red for higher temperatures, yellow for moderate, and blue for lower temperatures. The tables show a general trend of increasing temperatures over time and across scenarios, with RCP 8.5 showing significantly higher temperatures than RCP 4.5.

Figura 6. Temperaturas horarias y escala de sensación térmica de Acapulco Diamante para los RCP 4.5 y 8.5 en lo horizontes establecidos.

Fuente: Elaboración propia.

Incremento de temperatura central en el ser humano

Por medio de la implementación del modelo HSDA a partir de la base de datos de obtenida del MCG CRNMCM5 de temperatura máxima mensual (TM_{max}), fue posible realizar una estimación del incremento de la T_{c_f} o temperatura central del ser humano para cada región en estudio, según los horizontes planteados. El incremento de la T_{c_f} permite identificar los meses en que la temperatura ambiental, junto con factores personales, podrían poner en riesgo la salud de los habitantes de esa región. Para esto, se ha creado un gráfico que muestra la evolución de la temperatura central a lo largo del año en cada horizonte propuesto. Adicional a esto, se incluyen los límites de las temperaturas centrales que representan un riesgo en el ser humano. Estos son: riesgo ligero (38.1 °C), riesgo importante (38.1 °C-39.4 °C) y riesgo crítico (39.4 °C). Con base en las afectaciones en la salud mencionadas anteriormente, y para fines de este análisis, se entenderá que en los valores de riesgo ligero e importante podrán presentarse las afectaciones indicadas para temperaturas superiores a los 40 °C, y el riesgo crítico estará asociado a aquellas descritas para valores superiores a los 40 °C. La figura 7 muestra el comparativo de la región Tacubaya correspondiente a las temperaturas estimadas en los RCP 4.5 y 8.5. Los resultados indican que el comportamiento de la T_{c_f} será similar en ambos RCP, y en ninguno de los horizontes se estiman afectaciones a la salud debido al cambio climático.

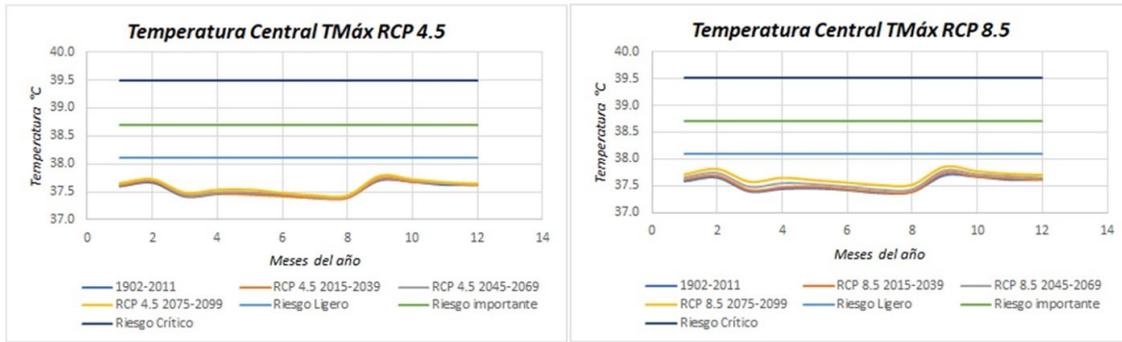


Figura 7. Incremento de temperatura central del habitante de la región de Tacubaya en los horizontes 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099 para los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la región de San Nicolás de los Garza, la figura 8 muestra que el mayor incremento de T_{c_f} se registrará entre los meses de junio y octubre. A partir del año 2045, en ambos RCP se estiman afectaciones importantes en la salud durante el mes de julio. Adicional a esto, se espera que los valores de T_{c_f} durante el mes de julio del RCP 8.5 a partir del año 2075 representen un riesgo crítico para la salud.

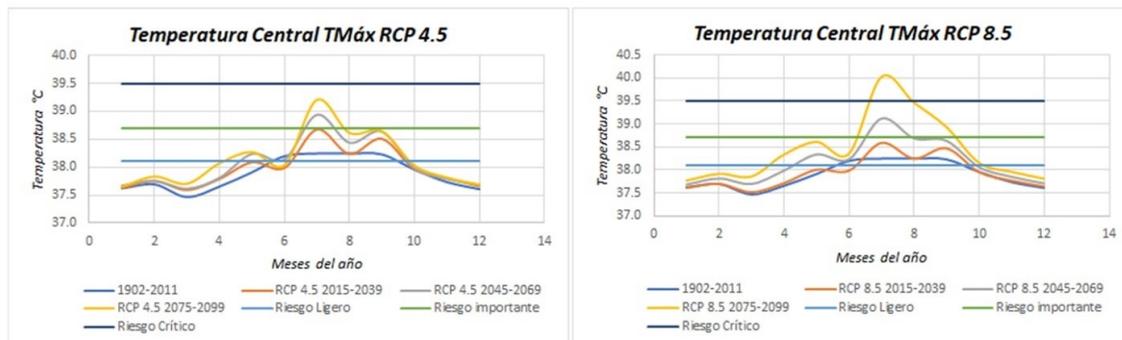


Figura 8. Incremento de temperatura central del habitante de la región de San Nicolás de los Garza en los horizontes 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099 para los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

La región de Acapulco Diamante, debido a su tipo de bioclima, presenta temperaturas por encima de la zona de confort durante todo el año, lo que representa un riesgo ligero para la salud. Esto se ve reflejado en la figura 9 en donde se estima que la T_{c_f} en todos los horizontes supera los 37 °C. Además, se prevé que en dicha región los valores de T_{c_f} en la mayor parte del año, a partir del 2045 (en ambos RCP), representen un riesgo importante para la salud. Adicional a esto, se estima que la T_{c_f} represente un riesgo crítico para la salud entre los meses de marzo y junio a partir del 2075 en el RCP 8.5.

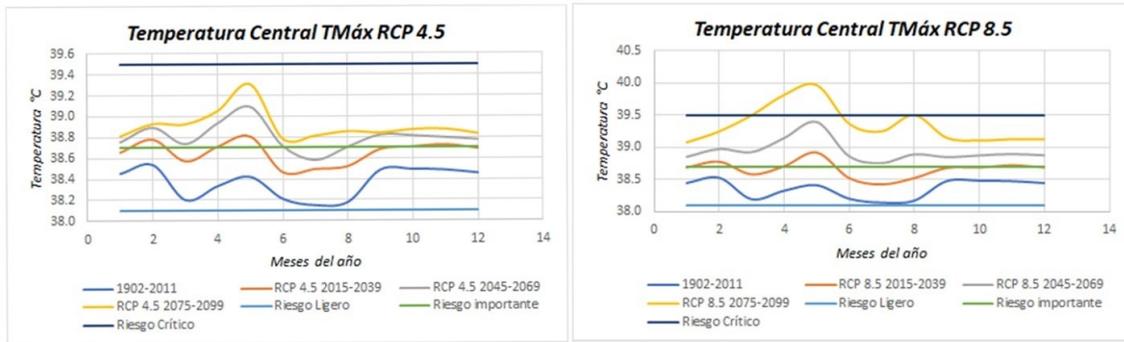


Figura 9. Incremento de temperatura central del habitante de la región de Acapulco Diamante en los horizontes 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099 para los RCP 4.5 y 8.5.
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La metodología propuesta ha demostrado su viabilidad para estimar los incrementos de las temperaturas de tres bioclimas de la República Mexicana y analizar las afectaciones en el confort térmico y salud de sus habitantes. Esta muestra permite tener una noción certera de los efectos del cambio climático en el confort térmico y salud de sus habitantes. Además, plantea la posibilidad de la replicabilidad del modelo establecido para el análisis futuro de otros bioclimas de la región.

Los resultados exponen un incremento inminente de las temperaturas locales en cada uno de los horizontes propuestos. Además, se muestra una modificación considerable en los valores de la ZCT y, en algunos casos, afectaciones importantes a la salud. Es necesario destacar que el RCP 8.5 representa una mayor amenaza para el bienestar del ser humano debido a que en el horizonte 2045-2069, en dos bioclimas, se registran incrementos de temperatura que resultarán en un riesgo importante para la salud. Las estrategias destinadas a mitigar los efectos del cambio climático deben construirse a partir de la presunción de una alteración del orden climático relacionado con temperaturas superiores a las consideradas normales, ya que en ninguno de los casos de estudio se prevén disminuciones de temperatura.

Los resultados también muestran que el proceso de aclimatación, impulsado por la termorregulación, se logra de manera gradual a través de cambios estacionales, en donde se pasa de meses con temperaturas templadas a cálidas (Shapiro *et al.*, 1981 y Inoue *et al.*, 1995, citados en Taylor, 2000). Sin embargo, la aclimatación no será el único requerimiento para asegurar el confort térmico y una buena salud. En los próximos años serán necesarias estrategias para reducir la exposición a través de modificaciones en los patrones sociales, tecnológicos, culturales y de comportamiento, como lo mencionan Hanna & Tait (2015).

Los resultados están en concordancia con lo establecido por el IPCC (2018), al mencionar que cualquier incremento en la temperatura global representará una afectación en la salud humana, y además ha señalado que existe un límite en la capacidad de adaptación a temperaturas extremas. Además, el incremento de olas de calor será proporcional al incremento de mortalidad en las zonas más vulnerables en donde las afectaciones a la salud sucederán de manera repentina (inclusive la muerte), durante el mismo día o dentro de uno a cuatro días de exposición, y ocurrirán de manera más frecuente en personas mayores (Loughnan *et al.*, 2013). Los resultados exponen que los habitantes de regiones con condiciones climáticas similares a las de Acapulco Diamante, a partir del 2045 (en ciertos meses del año), presentarán un

incremento de los valores de T_{c_f} que resultarán en riesgos importantes y críticos para su salud. Durante estos meses se espera que sean comunes los padecimientos relacionados al agotamiento por calor. Adicional a esto, aunque en un menor grado, se registrarán afectaciones más graves en la población relacionadas con el golpe de calor. Por tanto, estas regiones deberán de empezar a trabajar en estrategias para asegurar el bienestar térmico de sus habitantes.

Por último, se evidencia una clara necesidad de que el ser humano facilite el proceso de aclimatación a corto y largo plazo impulsado desde la termorregulación, como lo han señalado diversos autores (Hanna & Tait, 2015; Jendritzky & de Dear, 2009). Se ha demostrado que, a través de modificaciones en patrones de comportamiento y actividad física, el cuerpo humano puede mejorar su respuesta fisiológica a incrementos de temperatura. Esto facilitará el experimentar el confort térmico en temperaturas fuera de las establecidas en la ZCT y disminuirá las afectaciones en la salud relacionadas a olas de calor.

Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para la estimación y análisis de las afectaciones en el bienestar térmico y la salud del ser humano como consecuencia del cambio climático en tres regiones de la República Mexicana. Además, representa un método versátil que puede ser replicado y adaptado según la información disponible en la región de estudio. Los resultados evidencian diferentes niveles de afectación al ser humano en dependencia de las características climáticas específicas de cada región. Cada horizonte muestra un aumento de temperatura con respecto al anterior, resultando en una reducción de los momentos del día en que se experimentará el confort térmico. Esta reducción tendrá afectaciones negativas en el desempeño físico y mental del ser humano debido al esfuerzo que representará para el organismo lograr el proceso de termorregulación y su incidencia directa sobre el estado de ánimo, especialmente en climas extremos en donde se presentan bajas temperaturas en inviernos y altas en verano. Se espera que el proceso de aclimatación juegue un papel importante en aquellas regiones climáticas con temperaturas altas a lo largo de todo el año, y se estima que sus habitantes estarán mejor preparados para un incremento constante de temperaturas.

Las implicaciones que tendrá el cambio climático en el bienestar térmico y salud del ser humano son evidentes y es necesario construir modelos que faciliten estimar sus afectaciones. Esto permitirá el desarrollo temprano de medidas o estrategias de mitigación destinadas a proteger a los habitantes de regiones climáticas con mayores incrementos de temperaturas.

Conflictos de intereses

No existen conflictos de interés.

Referencias

- American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). (2016). *Standard 55 User's Manual: ANSI/ASHRAE standard 55-2013, thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.
- Beker, B. M., Cervellera, C., De Vito, A., & Musso, C. G. (2018). Human physiology in extreme heat and cold. *International Archives of Clinical Physiology*, 1(1), 1-8. <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.pdf>
- Blasco, R. (2012). Aclimatación al ejercicio físico en situaciones de estrés térmico. *Archivos de Medicina del Deporte*, 29(148), 621-631.

- http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/Revision_Aclimatacion_621_148.pdf
- Bouchama, A. & Knochel, J. (2002). Heat stroke. *The New England Journal of Medicine*, 346, 1978-1988. doi: DOI: 10.1056/NEJMra011089
- Candido, C. & de Dear, R. (2012). From thermal boredom to thermal pleasure: A brief literature review. *Ambiente Construido*, 12(1), 81-90. doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100006>
- Cheshire, W. P. (2016). Thermoregulatory disorders and illness related to heat and cold stress. *Autonomic Neuroscience*, 196, 91-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.01.001>
- Díaz, E. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII (2): 227-240. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/320545082_El_cambio_climatico
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A., & Trejo-Vázquez, R. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Fuentes, V., & Figueroa, A. (1990). *Criterios de adecuación bioclimática en la arquitectura IMSS No. 7300*. IMSS.
- Glazer, J. I. (2005). Management of heatstroke and heat exhaustion. *American Family Physician*, 71(11), 2133-2140. <https://www.aafp.org/afp/2005/0601/afp20050601p2133.pdf>
- González, F. (2013). *Zona de confort térmico para un grupo de población mexicana* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional.
- González-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S. L., Jensen, F. B., Hyldig, T., & Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *Journal of Applied Physiology*, 86(3), 1032-1039. doi: <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.3.1032>
- Gomez, A. (2007). Trastornos de la temperatura corporal. *OFFARM*, 26(7), 48-53. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13108301>
- Hall, J. (2016). *Guyton y Hall. Tratado de Fisiología Médica* (13ª Edición). Elsevier.
- Hanna, E. G., & Tait, P. W. (2015). Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 8034-8074. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph120708034>
- Inoue, Y., Nakao, M., Okudaira, S., Ueda, H. & Araki, T. (1995). Seasonal variation in sweating responses of older and younger men. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 70, 6-12. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00601802>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5 °C*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jendritzky, G., & de Dear, R. (2009). Adaptation and thermal environment. En K. Ebi, I. Burton & G. McGregor (eds.), *Biometeorology for adaptation to climate variability and change* (pp. 9-32). Springer.
- Kellogg, D. L. (2006). In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges. *Journal of Applied Physiology*, 100(5), 1709-1718. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01071.2005>
- Lasakosvitsch, F. (2018). *Homeostasis An integrated vision*. Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/homeostasis-an-integrated-vision/introductory-chapter-homeostasis>
- Loughnan, M., Tapper, N., Phan, T., Lynch, K., & McInnes, J. A. (2013). A spatial vulnerability analysis of urban populations during extreme heat events in Australian capital cities. *National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast (NCCARF)*. https://www.researchgate.net/publication/235725298_A_spatial_vulnerability_analysis_of_urban_populations_during_extreme_heat_events_in_Australian_capital_cities_Final_Report
- Montanero, J., & Minuesa, C. (2018). *Estadística básica para ciencias de la salud*. Universidad de Extremadura.

- Morrison, S. F., & Nakamura, K. (2011). Central neural pathways for thermoregulation. *Frontiers in Bioscience*, 16, 74-104. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3051412/>
- Neila, F. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Editorial Munilla-Lerfá.
- Pop, M., Criive, C., & Opincariu, I. (2018). Anatomy and function of the hypothalamus. En S. Baloyannis & J. Gordeladze (eds.), *Hypothalamus in health and diseases* (pp. 3-14). Londres, Reino Unido: IntechOpen. Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/hypothalamus-in-health-and-diseases/anatomy-and-function-of-the-hypothalamus>
- Potter, A. W., Blanchard, L. A., Friedl, K. E., Cadarette, B. S., & Hoyt, R. W. (2017). Mathematical prediction of core body temperature from environment, activity, and clothing: The heat strain decision aid (HSDA). *Journal of Thermal Biology*, 64, 78-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.01.003>
- Richmond, V. L., Davey, S., Griggs, K., & Havenith, G. (2015). Predictions of core body temperature from multiple variables. *Annals of Occupational Hygiene*, 59(9), 1168-1178. doi: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev054>
- Rintamäki, H. (2006). Human responses to cold. En N. Murphy & S. Krisvoschekov (eds.), *Circumpolar health 2006. Gateway to the international polar year. Proceedings of the 13th International Congress on Circumpolar Health. Novosibirsk, Russia, June 12-16, 2006*. Novosibirsk, Alaska State Medical Association.
- Shapiro, Y., Hubbard, R., Kimbrough, C. & Pandolf K. (1981). Physiological and hematologic responses to summer and winter dry-heat acclimation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 50(4), 792-8. doi: 10.1152/jappl.1981.50.4.792. PMID: 7263362.
- Taylor, N. A. S. (2000). Principles and practices of heat adaptation. *Journal of the Human-Environment System*, 4(1), 11-22. doi: <https://doi.org/10.1618/jhes.4.11>
- Tudela, F. (1982). *Bioclima y confort térmico*. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/26450/S8200506_es.pdf