

COMPARATIVA Y CALIBRACIÓN DE ÍNDICES DE CONFORT PARA LA TEMPORADA CÁLIDA EN UNA CIUDAD SEMI-ÁRIDA DEL NOROESTE DE MÉXICO

Recibido 24/06/2024
Aceptado 20/10/2024

COMPARISON AND CALIBRATION OF COMFORT INDICES FOR THE WARM SEASON IN A SEMI-ARID CITY OF NORTHWESTERN MEXICO

COMPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE ÍNDICES DE CONFORTO PARA A ESTAÇÃO QUENTE EM UMA CIDADE SEMIÁRIDA DO NOROESTE DO MÉXICO

Hiram Eduardo Urias-Barrera

Doctor en Ciencias

Profesor Investigador, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño

Universidad de Guadalajara, Jalisco, México

<https://orcid.org/0000-0003-0809-8842>

Hiram.urias@cuaad.udg.mx

RESUMEN

El análisis sobre modelos de confort y el efecto de las condiciones microclimáticas extremas es importante para determinar la relación entre las afectaciones de salud en personas que realizan actividades en áreas abiertas. El trabajo propone un modelo psicofisiológico regional, para individuos con actividades físicas intensas (deportivas) en espacios públicos exteriores en clima cálido seco extremoso (Mexicali, Baja California), el que se contrastó con el Universal Thermal Climate Index con el propósito de calibrarlo y así establecer una base comparativa para formular pruebas de hipótesis que evalúen su aplicabilidad. Se encontró que el modelo regional alcanzó un 67% de aciertos en comparación del Universal Thermal Climate Index que obtuvo 31% de aciertos no calibrado y 53% de aciertos calibrado. Como conclusión de este proceso se destaca la pertinencia, precisión y eficiencia en la utilización de modelos específicos regionales sobre aquellos que tienden a generalizar las condiciones de la percepción térmica.

Palabras clave

modelo psicofisiológico, confort térmico, actividad intensa, calibración de escala.

ABSTRACT

The analysis of comfort models and the effect of extreme microclimatic conditions is vital to determine the relationship between health affectations in people who perform activities in open areas. This work proposes a regional psychophysiological model for individuals with intense physical activities (sports) in outdoor public spaces in an extremely hot dry climate (Mexicali, Baja California), which was contrasted with the Universal Thermal Climate Index to calibrate it and thus establish a comparative basis to formulate hypothesis tests to evaluate its applicability. It was found that the regional model achieved 67% accuracy compared to the Universal Thermal Climate Index, which obtained 31% accuracy when not calibrated and 53% accuracy when calibrated. The conclusion of this process highlights the relevance, accuracy, and efficiency of using specific regional models over those that tend to generalize the thermal perception conditions.

Keywords

psychophysiological model, thermal comfort, intense activity, scale calibration.

RESUMO

A análise dos modelos de conforto e o efeito das condições microclimáticas extremas são importantes para determinar a relação entre as complicações de saúde em pessoas que realizam atividades em áreas abertas. O artigo propõe um modelo psicofisiológico regional para indivíduos com atividades físicas intensas (esportivas) em espaços públicos externos em clima quente e seco extremo (Mexicali, Baja California), que foi contrastado com o Universal Thermal Climate Index para ser calibrado e, assim, estabelecer uma base comparativa para formular testes de hipóteses para avaliar sua aplicabilidade. Verificou-se que o modelo regional alcançou uma taxa de precisão de 67% em comparação com o Universal Thermal Climate Index, que obteve 31% de precisão sem calibração e 53% de precisão com calibração. A conclusão deste processo destaca a relevância, a precisão e a eficiência do uso de modelos regionais específicos em relação àqueles que tendem a generalizar as condições de percepção térmica.

Palavras-chave:

modelo psicofisiológico, conforto térmico, atividade intensa, calibração de escalas.

INTRODUCCIÓN

El confort térmico y su efecto en la salud es un tema preocupante actualmente (Peng et al., 2019), sobre todo en lo que respecta a la percepción térmica de los individuos que realizan actividades deportivas en los espacios públicos exteriores; Ya que, como menciona Nikoloupolou y Lykoudis (2006) y Manavvi y Rajasekar (2022), éste es una característica que contribuye a la calidad del ambiente urbano y es una característica que colabora a aumentar los niveles de ocupación, el uso y mejora el desarrollo de actividades de esparcimiento, recreación y de salud (Lai et al., 2020).

El confort térmico se entiende de diferentes maneras es la condición de satisfacción mental del individuo con el entorno térmico; por otro lado, también puede ser un estado de satisfacción fisiológica y psicológica de los individuos con el entorno térmico (ISO 7730; Nikoloupolou y Lykoudis, 2006; Manavvi y Rajasekar, 2021), en este sentido, la convergencia de las partes subjetivas y objetivas de la percepción térmica y la búsqueda de confort están determinadas en los procesos adaptativos; aun así el confort térmico es un proceso complejo por definir, evaluar y estudiar, lo que dificulta establecer un concepto adecuado para el mismo (Dashrath-Khaire, et al., 2021).

Por ello, realizar investigaciones para comprender los efectos que los climas tienen sobre la salud de los individuos es importante hoy en día (González-González, 2021); las nuevas tendencias se han centrado en comprender sustancialmente la relación entre las condiciones meteorológicas y la percepción térmica de los individuos en espacios públicos al aire libre y como en el caso presentado, bajo actividades deportivas intensas (tasa metabólica 600w/m²) y en climas cálidos secos extremos (de Dear, 2011; Candido et al., 2012; Fernández García et al., 2012; Tumini et al., 2015; Jiaqi et al., 2022; Liu, 2023).

Actualmente existen trabajos de revisión en los que se llega a enlistar hasta 140 índices de confort (Epstein y Moran, 2006; Carlucci y Pagliano 2012; De Freitas y Grigorieva, 2015). De aquí se entiende la pertinencia de la generación de estudios los que desarrollan y comparan índices que tengan como objetivo establecer, medir y validar la respuesta térmica de las personas.

Es importante mencionar que existen diferentes tipos de modelos de confort: univariados como los desarrollados por Martínez-Bermúdez, (2024), Nuñez et al. (2024), Martín del Campo (2020), Rincón et al. (2020), López-Cañedo (2021), Bojórquez et al. (2014) que toman en cuenta únicamente la correlación entre una variable meteorológica y la sensación térmica; Por otro lado, existen modelos multivariados e índices de temperatura, como el Actual Sensation Vote – ASV

(Nikolopoulou y Lykoudis, 2006), la Standar Effective Temperature, -SET-, Predicted Mean Vote – PMV y el Universal Thermal Climate Index (UTCI), desarrollados con el fin de vincular las condiciones meteorológicas con la sensación térmica (Fang et al., 2019) que se basan en el equilibrio térmico del usuario con el medio que le rodea, los procesos de termorregulación humana (aspectos fisiológicos: metabolismo, sexo, edad, estado de salud) y aspectos psicológicos (adaptación, tolerancia, expectativa, experiencia, en algunos casos).

Cuantiosos índices desarrollados, se caracterizan por evaluar el confort en espacios interiores pero son pocos los ejemplos importantes que se pueden utilizar para evaluar la percepción térmica y el confort en espacios exteriores y éstos disminuyen cuando se trata de sujetos que realizan deportes o actividades intensas en sus diferentes magnitudes -como es el caso del modelo desarrollado en este trabajo-, los que complejizan los estudios por la alteración de cuestiones metabólicas, de termorregulación y del equilibrio térmico de las personas; por lo tanto, desarrollar un índice o modelo de confort se complica por las características peculiares de los espacios urbanos abiertos y las condiciones de los usuarios (Johansson, 2006), pues intervienen los diferentes aspectos del proceso de sensación y confort térmico (expectativa, experiencia, adaptación, vestimenta, tiempo de exposición, etc.); en este sentido, también se han comenzado a tomar en cuenta aspectos psicológicos y culturales para el desarrollo de éstos. (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012).

Por otro lado, El UTCI, es uno de los índices más utilizados y actualmente es un referente base en el desarrollo de otros modelos de adaptación fisiológica para generar índices de temperatura equivalente (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012). A raíz estudios como los de Tumini y Pérez (2015) y más recientes como el de Jing (2024), Liu (2023), Boussaidi (2023), Manavvi y Rajasekar (2023), Ghani et al. (2021), Barcia-Sardiña (2020), Marchante (2020), se ha comparado a éste con otros índices similares para demostrar la fiabilidad y aplicabilidad al correlacionar los resultados del mismo y establecer así su eficiencia al momento de ser aplicado; en algunos casos se han realizado comparativas y calibraciones, como las desarrolladas por Monteiro y Alucci (2009) estableciéndose la aplicabilidad de los índices o su eficiencia.

De tal modo en base a los trabajos mencionados, para realizar una comparación entre índices se debe tomar en cuenta: que ambos se calculen, a través de variables meteorológicas que afecten al confort térmico en espacios exteriores y que ambos puedan evaluar la sensación térmica bajo un valor numérico asociado a una escala cualitativa de percepción y cuantitativa de variables meteorológicas.



Figura 1.- Mexicali, Baja California. Fuente: Elaboración del autor.

Por lo tanto, el artículo pretende establecer la fiabilidad de la aplicación de un modelo de adaptación fisiológico-racional y un modelo de adaptación psicofisiológico-empírico, al realizar una comparación entre ambos bajo condiciones de actividades intensas y deportivas en un clima cálido seco. Y con esto determinar qué tan aplicable es el UTCI bajo estas características y establecer la confiabilidad de éste en condiciones similares; para desarrollar el estudio, se realizaron simulaciones de VST con los índices y análisis comparativos de los resultados obtenidos para determinar la exactitud de cada uno, además se reforzó la discusión con análisis estadísticos para validar los resultados.

METODOLOGÍA

Para realizar la comparación de ambos índices de confort térmico, se parte del entendimiento de la región y las condiciones climáticas, para ello se hizo una descripción y caracterización del modelo UTCI, se generó una descripción del desarrollo del modelo regional y por último se puntualizó en el proceso de simulación y análisis estadísticos de los datos.

LOCALIZACIÓN DE ZONA DE APLICACIÓN

Mexicali se localiza al noroeste de México (Figura 1) y se encuentra ubicada a 32.65° N y -115.45° W y el clima es cálido seco extremoso [BW (h") hs (x") (e")] según la clasificación Köppen-García; tiene una temperatura

media anual mayor a 23.0° C y menor a 18.0° C en el mes más frío. Las características del período cálido son: temperatura promedio máxima normal de 42.0° C y máximas extremas superiores a los 50.0° C, una humedad relativa del período ronda entre los 10% al 65%; en cuanto a la velocidad de viento, éste oscila entre los 0.10 m/s hasta 4.0 m/s con una Radiación Solar promedio de 937 W/m² en el mes de julio.

ÍNDICE UTCI

El UTCI es un modelo de adaptación fisiológica que puede ser aplicado y utilizado para regiones diversas; desarrollado a partir de sujetos no aclimatados, en espacios exteriores y en condiciones meteorológicas variables. Su finalidad es dar información para evitar afectaciones climáticas adversas en la salud y como herramienta de impacto del cambio climático en aspectos de morbilidad y mortalidad de la población (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012).

Se establece como un índice de "temperatura equivalente" (Te) de ambiente de referencia, bajo un criterio de respuesta fisiológica con exposiciones de 30 y 120 minutos y expresado en grados centígrados ($^{\circ}$ C) equivalentes en escala de valores de estrés térmico (Tabla 1) (Bröde et al., 2012). Las variables meteorológicas que utiliza son: temperatura del aire ($^{\circ}$ C), temperatura radiante media ($^{\circ}$ C), humedad relativa (%) o presión de vapor de agua (hPa) y velocidad del viento (m/s).

El índice se calcula al utilizar el modelo de regresión lineal múltiple (Błażejczyk y Kunert, 2011) cuya expresión se muestra en la Ecuación 1.

Tabla 1. Codificación y propiedades térmicas de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración propia del Autor.

Rango UTCI (°C eq)	Categoría de estrés
Por encima de +46	Estrés por calor extremo
+38 a +46	Estrés por calor muy fuerte
+32 a +38	Estrés por calor fuerte
+26 a +32	Estrés por calor moderado
+9 a +26	Sin estrés térmico
+9 a 0	Estrés por frío ligero
0 a -13	Estrés por frío moderado
-13 a -27	Estrés por frío fuerte
-27 a -40	Estrés por frío muy fuerte
Por debajo de -40	Estrés por frío extremo

Nota: °C eq, significa grados centígrados equivalentes

$$UTCI^* = 0.84 \cdot ta + 0.246 \cdot Tmrt - 2.45 \cdot v + 0.204 \cdot vp - 0.01$$

(Ecuación 1)

De la que:

UTCI*= índice de temperatura equivalente (°C)

ta= temperatura de aire (°C).

Tmrt= temperatura radiante media (°C).

v= velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

vp= presión de vapor en el ambiente (hPa).

MODELO PSIFISIOLOGICO REGIONAL (VSTAI)

El VSTai toma de referencia a la norma ISO 10551 que establece votos de sensación térmica por medio de escalas subjetivas y objetivas de percepción ligadas a variables climáticas, a través de análisis estadísticos de correlación (Pearson), las que son: temperatura de bulbo seco (Ta), Humedad Relativa (Hr), Velocidad de Viento (v) y Temperatura Radiante Media (Trm) (Tabla 2); y con ellas desarrollar un modelo estadístico matemático multivariado (Jiaqi et al., 2022; Sarhadi y Rad. 2020).

La muestra calculada fue de 300 encuestas con una confiabilidad del 95%; La temporada analizada en este trabajo es la cálida (mayo-septiembre) y se recolectaron 332 observaciones con las que se obtuvieron los datos para la generación del modelo; en total se obtuvo un 10% más de encuestas de las calculadas lo que dio margen para discriminar aquellas que no contaban con la calidad de datos necesarios y sin dejar de ser una muestra representativos.

Para la toma de datos en campo, se elaboró un instrumento de recolección bajo criterios de las normativas de confort vigentes (ISO 10551, ISO7730,

Tabla 2.-Correlaciones de variables meteorológicas con la sensación térmica. Fuente: Elaboración del autor.

Variable meteorológica	Coefficiente Pearson
Ta	0.53
Hr	0.23
v	0.16
Rs	0.07
Trm	0.52

Muestra, recolección y análisis de datos para el desarrollo del modelo

ISO 7726, ISO 9920), conformándose de este modo un cuestionario con una estructura de ocho partes: Datos de control, percepción térmica, percepción lumínica y acústica, historial térmico, datos fisiológicos, aislamiento por ropa, variables meteorológicas y características del medio construido; en total el instrumento cuenta con 59 reactivos (Tabla 3).

En la recolección de datos meteorológicos los instrumentos se colocaron en un rango no mayor de 10 metros de los individuos encuestados (Figura 2) para cumplir con lo dictado en la ISO 7730; con ellos se tomaban lecturas de las variables analizadas (ta, hr, v) y estos cumplían con la normatividad de la ISO 7726 (Tabla 4). Se utilizaron herramientas complementarias para recabar datos fisiológicos de los individuos como basculas, cinta métrica, termómetros infrarrojos de piel y de oído, como también monitores de presión arterial, los que fueron recolectados para el cálculo de la tasa metabólica y la producción de calor; estos datos si bien fueron importantes en el estudio no entraron directamente en el desarrollo del modelo VSTai.

Tabla 3.- Consultas del instrumento para recolección de datos de percepción térmica. Fuente: Elaboración del autor.

Sección	Tipo de pregunta	Escala de respuestas (cualitativa y numérica)						
		1	2	3	4	5	6	7
Sección Percepción térmica	¿Cómo se siente en este momento?	Mucho frío	Frío	Algo de frío	Ni calor, ni frío	Algo de calor	Calor	Mucho calor
	¿Cómo preferiría sentirse en este momento?	Mucho más frío	Más frío	Un poco más frío	Sin cambio	Un poco más caliente	Más caliente	Mucho más caliente
	¿Cómo se siente en este momento con respecto a la humedad?	Muy húmedo	Húmedo	Algo Húmedo	Normal	Algo seco	Seco	Muy seco
	¿Qué preferiría en estos momentos con respecto a la humedad?	Mucho más húmedo	Más húmedo	Un poco más húmedo	Sin cambio	Un poco más seco	Más seco	Mucho más seco
	¿Cómo siente el viento en este momento?	Nada de viento	Algo de viento	Viento agradable	Algo fuerte	Muy fuerte		
	¿Cómo preferiría el viento en este momento?	Menos viento	Sin cambio	Más viento				
	¿Cómo siente la radiación solar en su piel en estos momentos?	Nada de radiación	Algo de radiación	Radiación agradable	Radiación algo fuerte	Radiación muy fuerte		
	¿Cómo preferiría la radiación solar en su piel en estos momentos?	Menos radiación	Sin cambio	Más radiación				
	¿Cómo considera el clima en el lugar?	Generalmente aceptable	Generalmente inaceptable					
	¿Qué tan tolerable le parece el clima en este momento?	Perfectamente tolerable	Tolerable	Entre tolerable e intolerable	Intolerable	Extremadamente intolerable		

Tabla 4. Especificaciones de los instrumentos meteorológicos. Fuente: Elaboración del autor.

Características del equipo	Equipo usado		
	Monitor de estrés térmico ExTech 30	Anemómetro unidireccional A10	Radiómetro Dr. Meter SM206
Parámetro - unidad	Temperatura de bulbo seco (TA, °C) y humedad relativa (HR, %)	Velocidad de viento, (VV, m/s)	Radiación solar (RS W/m ²)
Rango de medición	TA: 0 a 50 °C, ± 1°C; HR: 0 a 100%.	VV: 0.1 a 20 m/s	RS: 1-3999 W/m ²
Precisión	TA ±0,1°C; HR: ±3%	±3%, ± 0.30.	0.1 W/m ² , ±5%
Frecuencia de registro	Todos toman 1 muestra por segundo		

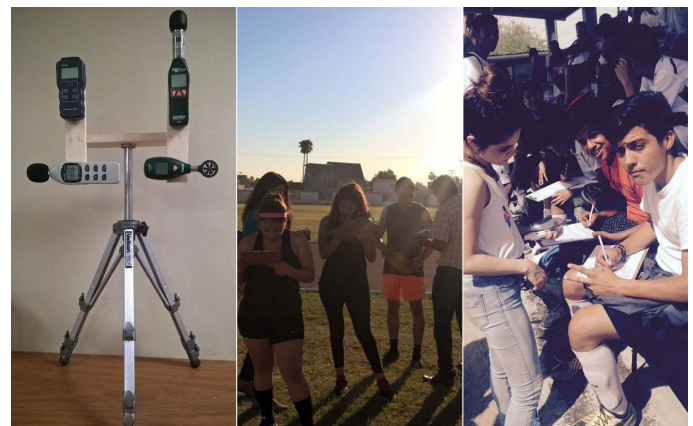


Figura 2.- Montaje de instrumentos utilizados para recolección de datos meteorológicos y proceso de realización de encuestas. Fuente: Elaboración del autor.

Se seleccionaron dos espacios con diversidad de actividades físicas y horarios de funcionamiento extendidos como lo son la unidad deportiva de La Universidad Autónoma de Baja California y el complejo Deportivo Municipal "Ciudad deportiva" (Figura 2) el trabajo de campo se estableció en relación a los días representativos del periodo cálido (23 de julio al 8 de agosto para este caso), el que se caracterizó por las condiciones climáticas siguientes: t_a 30.1 °C a 40.8 °C, hr 13% a 57%, v 0.1 m/s a 2.88 m/s, T_{rm} (calculada) 31.2 °C a 97.6 °C.

La población de estudio fluctuó entre los 17 y los 60 años, fue seleccionada de manera determinística y con nivel de actividad intensa, se les aplicó la encuesta dependiendo del tipo de actividad deportiva desarrollada de manera individual, uno a uno, o en grupo (para hacer eficiente el proceso); para el análisis de la percepción térmica, se utilizó una escala numérica de 7 niveles, que van de mucho frío (1) a mucho calor (7) (Tabla 5).

Tabla 5. Votos de Sensación Térmica del Estudio. Fuente: Elaboración del autor.

Valoración Voto Sensación Térmica ISO 10551	
7	mucho calor
6	calor
5	algo de calor
4	ni calor ni frío
3	algo de frío
2	frío
1	mucho frío

El análisis de datos se llevó a cabo en el programa Statistica 12 que inició con pruebas de correlación de Pearson para determinar las variables significativas (Tabla 2), posteriormente se realizó un estudio de residuales para ajustar la normalidad de la muestra (se discriminó aquellas respuestas que salieron de las ± 2 desviaciones estándar, un total del 3% quedó fuera del desarrollo de éste) y posteriormente se generó el modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación 2); en el mismo, se descartó la radiación por ser la que tenía el coeficiente menor en relación con la ST.

$$VST_{ai} = 0.27 \cdot t_a + 0.068 \cdot hr - 0.092 \cdot v + 0.0047 \cdot T_{rm} - 5.95$$

(Ecuación 2)

De la que:

VST_{ai} = Voto de Sensación Térmica en actividad intensa (sin unidad)

t_a = temperatura de aire (°C).

T_{rm} = temperatura radiante media (°C).

v = velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

hr = humedad relativa (%).

PROCESO COMPARATIVO DE ÍNDICES

El análisis comparativo partió de transformar el modelo VST_{ai} a un índice de T_e con grados centígrados equivalentes a niveles de estrés por el calor. Por lo que se generó un índice determinado con una temperatura equivalente en actividad intensa ($T_{e, re}$, Ecuación 3) (Monteiro y Alucci, 2009) con la suposición de un ambiente de referencia caracterizado por: $T_{rm} = T_a$; $hr = 50\%$ y $v = 0.1$ m/s; Al considerar esto la relación entre la temperatura del aire del medio ambiente de referencia y la percepción sensación térmica es la siguiente:

$$T_{a, re} = 3.64VST_{ai} + 9.2827$$

(Ecuación 3)

De la que:

$T_{a, re}$ = temperatura de aire de referencia (°C).

VST_{ai} = Voto de sensación térmica en actividad intensa.

Se sustituye la ecuación 2 en la ecuación 3, y se obtiene el modelo de temperaturas equivalentes en actividad intensa:

$$T_{e, ai} = 0.98 \cdot t_a + 0.25 \cdot hr - 0.34 \cdot v + 0.017 \cdot T_{rm} - 12.378$$

(Ecuación 4)

De la que:

$T_{e, ai}$: temperatura equivalente en actividad intensa (°C).

t_a = temperatura de aire (°C).

T_{rm} = temperatura radiante media (°C).

v = velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

hr = humedad relativa (%).

Ésta, se conceptualizó como una escala de sensación térmica que presentó valores numéricamente equivalentes a los del UTCl, lo que permitió la homologación de ambos índices, además de establecer los rangos de temperatura equivalente en actividad intensa para la escala de VST_{ai} .

Se utilizó un total de 332 observaciones, las que se recopilaron de la base de datos propia, con ello se calculó el VST con ambos modelos; la simulación se estableció bajo las características de la temporada cálida de sensación térmica de la región, sujetos con actividades deportivas intensas y en condiciones extremas de variables meteorológicas.

Se asoció entonces la temperatura equivalente calculada (Ecuación 1 y Ecuación 4) para tener una base comparativa de los índices; posteriormente, mediante la extrapolación empírica de rangos de niveles de estrés de cada uno de ellos, se determinó la escala numérica a los valores resultantes de T_e del UTCl, se generó una homologación de ambos y se realizó la comparativa (Tabla 6).

Tabla 6. Escalas homologadas entre VSTai y UTCI. Fuente: Elaboración del autor.

UTCI categoría de estrés	VST	Escala ISO 10551
Estrés por calor intenso y/o extremo	7	mucho calor
Estrés por calor fuerte	6	calor
Estrés por calor moderado	5	algo de calor
Confort térmico	4	ni calor ni frío
Estrés por frío leve	3	algo de frío
Estrés por frío moderado a fuerte	2	frío
Estrés por frío intenso y/o extremo	1	mucho frío

Tabla 7. Comparativa de simulaciones de modelo y valor para pruebas de hipótesis. Fuente: Elaboración del autor.

	observaciones	Suma Respuestas	Media	Varianza	F crítica	F Calculada	Z crítica	Z Calculada
VST	332	1853	5.58	1.07	-	-		
VSTai	332	1873.31	5.73	0.18	3.86	3.36	±1.96	-1.84
UTCI eq	332	2361.1	7.11	0.59	3.86	473.19	±1.96	-21.78
UTCI eqcal	332	2111.8	6.46	0.18	3.86	463.10	±1.96	-18.63

Para establecer la pertinencia del estudio, se realizaron análisis estadísticos comparativos de los modelos respecto al VST; se realizó un análisis correlacional lineal de Pearson y Spearman que permitió establecer cuantitativamente la forma en que se asocian los resultados; ambos coeficientes se calcularon para tener un punto comparativo, que anticipó que el coeficiente de Spearman es robusto ante la presencia de datos atípicos y con ello obtener mayor certeza de la normalidad de la muestra.

Por otro lado, el desarrollo del análisis de varianza ANOVA y pruebas Z permitió comparar las medias grupales (los VST y los calculados por los índices), esto determinó que al menos alguno de ellos difería significativamente entre los grupos. Con este proceso, se buscó validar las hipótesis planteadas de la eficiencia y aplicabilidad de cada uno de los modelos en las condiciones regionales.

RESULTADOS

El modelo para la ciudad de Mexicali (VSTai) y el índice TE_{ai} que se desarrollaron específicamente para la región, fueron más eficiente al momento de calcular el VST; lo que concordó principalmente con Barcia-Sardiña (2020), Monteiro y Alucci (2009), se visualizó en los resultados del proceso que efectivamente un modelo no regional tendía a una sobreestimación de la ST (ver las medias VST de la Tabla 7); en cambio el VSTai calculó VST más acertados, ya que su media sólo discrepó en un 3 % en relación con las respuestas observadas en las bases de datos.

Las diferencias observadas al calcular el VST con el modelo VSTai y el UTCI son significativas, la variabilidad demuestra mayor homogeneidad en el modelo regional al obtener mejores cálculos en comparación con el otro índice. Esto se puede visualizar al momento de establecer las medias de predicciones y compararla con el de los VST recabada de los sujetos donde se tienen una diferencia de solo 0.15 (VSTai) y 1.53 en comparación con el VST equivalente para el UTCI; aún con el índice UTCI calibrado, el valor de sus predicciones continúa muy alejada al de los votos observados el que es .86 puntos de la percepción térmica (tabla 7). Esto confirma el análisis de varianza con el que se determinó la diferencia de medias entre el VST y el UTCI y se robustece con la prueba Z, que con el parámetro calculado de -1.84 corroboró la fiabilidad del modelo regional ya que acepta la hipótesis de homogeneidad de la media entre VST y VST calculado por el mismo.

Todo esto se enmarca en la formulación de mayor eficiencia de los modelos regionales, esto corrobora lo encontrado por Monteiro y Alucci (2009) que menciona que un modelo regional con enfoque adaptativo aun al contar con menores coeficientes de determinación, son mejores al momento de calcular el voto de confort.

También se visualizó que la correlación de Pearson es mayor entre el VSTai y los VST en comparación al UTCI calibrado (Tabla 8); se puntualizó la efectividad de predicción del modelo psicofisiológico con un porcentaje de aciertos de 67%, mientras que el UTCI solamente contó con un 31%. Incluso se observó al comparar los resultados

Tabla 8. Correlación entre VST y predicciones de ST de los modelos. Fuente: Elaboración del autor.

	Correlación		Aciertos %	Calibración de índice		
	Pearson	Spearman		Correlación Pearson	Correlación Spearman	Aciertos %
VSTai	0.31	0.32	67	-	-	-
UTCI eq cal*	0.12	0.14	31	0.18	0.21	53

Nota: UTCI eq cal se refiere a la calibración empírica hecha al Universal Thermal Climate Index

Tabla 9. Calibración empírica del UTCI en relación con el VSTai. Fuente: Elaboración del autor.

UTCI (°C) rango calibrado	Categoría de estrés	Escala ISO 10551	
Por encima de +36	Estrés por calor extremo	7	mucho calor
+31 a +36	Estrés por calor fuerte	6	calor
+28 a +31	Estrés por calor moderado	5	algo de calor
+24 a +28	Confort térmico	4	ni calor ni frío
+20 a 24	Estrés por frío leve	3	algo de frío
+17 a 20	Estrés por frío moderado a fuerte	2	frío
Debajo de + 17	Estrés por frío intenso	1	mucho frío

del UTCI calibrado una cantidad de votos acertados del 53%, con lo que el modelo regional sigue obteniendo mejores parámetros estadísticos, adaptándose mejor a las condiciones.

Así mismo, se observó que las correlaciones de Spearman son mejores en el VSTai, lo que demuestra una validación de fiabilidad del VSTai en la región en comparación al otro modelo, estableciéndose mayor eficiencia para predecir la sensación térmica.

A raíz de esto la calibración realizada al índice UTCI (Tabla 8), proporcionó una mejor correlación con los datos empíricos recopilados y en consecuencia un mayor porcentaje de predicciones correctas. Con esto se infiere que, lo adecuado es utilizar el modelo que tenga una mayor correlación entre VST y las predicciones de éstos; lo anterior fundamenta los resultados encontrados puesto que, aun al ser calibrado el modelo UTCI siguió con una tasa de aciertos menor al modelo VSTa, que como se mencionó anteriormente, concuerda con lo encontrado con Monteiro y Alucci (2009).

Por otro lado, el Índice TE_{ai} presenta la correlación más alta entre el parámetro del modelo y las respuestas del sujeto, lo que lleva también a mejorar las predicciones al momento de realizar simulaciones de éste; por lo que las estimaciones de un modelo de equilibrio termofisiológico

y de adaptación que necesita varias iteraciones para proporcionar resultados confiables (VSTai) presenta mejores resultados y refleja la importancia de la adaptación y aclimatación de los sujetos a las condiciones meteorológicas de la región.

CONCLUSIONES

La comparación entre los dos índices de Te - UTCI y TE_{ai} - demostró que el desarrollo de modelos e índices de confort es de importancia al momento de predecir la percepción térmica de los sujetos en un ambiente exterior; El modelo VSTai con una escala de medición de la sensación térmica (numérica solamente) no es suficiente, por lo que es imperante que además se reflejen rangos de temperaturas equivalentes para una mejor aplicación e interpretación, como lo desarrollado en la investigación para poder generar estos puntos de comparación (Błazejczyk et al., 2000; Monteiro y Alucci 2011; Błazejczyk et al., 2012).

El estudio empírico comparativo hecho con el UTCI permitió la verificación de los resultados para dar validez al modelo desarrollado y establecer su efectividad a través de pruebas estadísticas de hipótesis; Esto concuerda con las investigaciones mencionadas, donde los modelos

regionales son más adecuados al momento de calcular la Te y VST (Monteiro y Alucci 2009) y parcialmente con el de Tumini y Pérez (2015), donde el UTCL si bien se comparó con otro modelo, no tenía una misma escala de medición. Esto contribuye a robustecer el interés de los investigadores a generar este tipo de modelos e índices que ayudan al entendimiento de los efectos de las variables microclimáticas en la salud de las personas.

Por lo tanto, al realizar una comparativa de varianza de medias de los resultados del VSTaí con modelo predictivo (incluso calibrado) se determinó su aplicabilidad y fiabilidad; esto concuerda con Monteiro y Alucci (2009). que calibró diversos índices a partir de un modelo regional el que demostró que aun así se sobrestimó la ST de las personas.

La principal contribución del trabajo realizado fue proporcionar un índice de temperatura equivalente (TE_{ai}) derivado de un modelo psicofisiológico (Ecuación 4) que es fácil de usar, intuitivo y confiable que ayuda a evaluar el confort térmico en espacios al aire libre; este tipo de trabajos aporta un entendimiento de cómo los aspectos del confort pueden afectar a la salud en climas extremos y cómo la tasa metabólica alta, la aclimatación, adaptación y el aspecto psicológico afecta a la percepción ambiental y sirve como base para generar sistemas de alerta temprana en la región.

Prospectivamente es necesario considerar:

- Por los límites en los que fue desarrollado el modelo y la validación del TE_{ai} propuesto no puede aplicarse en otras regiones con otros climas, puesto que sobrestimaría o subestimaría la sensación térmica por las características propias de la región, los niveles de actividad de las personas y las condiciones urbanas.
- Es necesario aumentar la cantidad de observaciones y para corroborar la efectividad del modelo y de los rangos propuestos en TE_{ai}.
- Sería conveniente, generar trabajos en diferentes climas al del estudio para corroborar el comportamiento del modelo bajo condiciones diversas.
- Determinar, como el aspecto subjetivo del confort interviene en el aumento de la fiabilidad de los modelos que se desarrollan.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, H.E.U.B.; Curación de datos, H.E.U.B.; Análisis formal, H.E.U.B.; Adquisición de financiación; Investigación, H.E.U.B.; Metodología, H.E.U.B.; Administración de proyecto, H.E.U.B.; Recursos; Software, H.E.U.B.; Supervisión, H.E.U.B.; Validación,

H.E.U.B.; Visualización, H.E.U.B.; Escritura – borrador original, H.E.U.B.; Escritura – revisión y edición, H.E.U.B.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología, además del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo brindado a la investigación doctoral titulada “Confort térmico en espacios públicos exteriores para actividades deportivas intensas: en clima cálido seco extremoso” número de CVU 556780, de la cual se desprende este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barcia-Sardiñas, S., Otero-Martín, M., Hernández-González, D., Gómez-Díaz, D., y Gómez-Camacho, L. (2020). Comparación de diferentes índices bioclimáticos en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802020000300008&lng=es&tlng=es.

Blazejczyk, K., Tokura, H., Borkwicz, A., y Szymczak, W. (2000). Solar radiation and thermal physiology in man [Paper presentation]. International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, 15, 1999, Sydney. Geneva: World Meteorological Organization, p. 267-272.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., y Tinz, B. (2012). “Comparison of UTCL to selected thermal indices”. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515– 535.

Blazejczyk, K. y Kunert, A. (2011). *Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland*. Institute of Geography and Spatial Organization.

Bojórquez-Morales, G., Gómez-Azpeitia, G., García-Cueto, R., Romero-Moreno, R., Luna-León, A., García-Gómez, C., y Ruiz-Torres, P. (2014). *Confort térmico en espacios públicos exteriores en periodo cálido*. Ekotectura, Bogotá, Colombia.

Boussaidi, K., Djaghroui, D., Benabbas, M. y Altan, H. (2023). Assessment of Outdoor Thermal Comfort in Urban Public Space, during the Hottest Period in Annaba City, Algeria. *Sustainability*, 15(15), 11763. <https://doi.org/10.3390/su151511763>

Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., y Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCL). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

Candido, C., y de Dear, R. (2012). From thermal boredom to thermal pleasure: a brief literature review. *Ambiente Construido*, 12(1), 81-90. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100006>

- Carlucci, S., y Pagliano, L. A. (2012). A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53(1), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>
- Dashrath-Khaire, J., Ortega-Madrigal, L., y Serrano-Lanzarote, B. (2021). Outdoor thermal comfort in built environment: A review of studies in India. *Energy and Buildings*, 303, 113758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113758>
- De Freitas, C. R., y Grigorieva, E. A. (2015). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices, *International Journal of Biometeorology*, 59, 109-120. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>
- de Dear, R., (2011). Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia. *Building Research & Information*, 39(2), 108-117. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552269>
- Epstein, Y., y Moran, D. S. (2006). Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health*, 44(3), 388-398. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>
- Fang, Z., Feng, X., Liu, J., Lin, Z., Ming-Mak, J., Niu, J., Tse, K., y Xu, X. (2019). Investigation into the differences among several outdoor thermal comfort indices against field survey in subtropics, *Sustainable Cities and Society*, 44, 676-690. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.022>
- Fernández García, F., Galán, E., y Cañada Torrecilla, R. (2012). Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET), *Territoris*, 8, 505-514. <https://raco.cat/index.php/Territoris/article/view/259755>
- Ghani, S., Mahgoub, A., Bakochristou, F. y ElBialy, E. (2021). Assessment of thermal comfort indices in an open air-conditioned stadium in hot and arid environment, *Journal of Building Engineering*. 40, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102378>
- González González F. (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, <https://doi.org/10.15174/au.2021.3071>
- International Organization for Standardization. ISO 10551. (2019) Ergonomics of thermal environment – assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. Ed. International Organization for Standardization, Ginebra.
- International Organization for Standardization. ISO 7730, (2006). Moderate thermal environment-determination of the PMV and PPD indices and specifications of conditions of thermal comfort. E.U.A.: International organizations for Standardizations.
- International Organization for Standardization. ISO 9920. (2007). Ergonomía del ambiente térmico. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa. E.U.A.: International organizations for Standardizations.
- International Organization for Standardization. ISO 7726. (1998). Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas. E.U.A.: International organizations for Standardizations.
- Jiaqi, N., Jiangpeng, X., Hongqiao Q., Jinming H., Jianfeng D., Guifeng H., y Jie Y., (2022). Influence of thermal comfort of green spaces on physical activity: Empirical study in an urban park in Chongqing, China, *Building and Environment*, 219, 109168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109168>
- Jendritzky, G., de Dear, R., y Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index?, *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Jing, W., Qin, Z. y Mu, T. (2024). Evaluating thermal comfort indices for outdoor spaces on a university campus, *Scientific Reports*, 14, 21253. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71805-5>
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco, *Building and Environment*, 41(10), 1326-1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>
- Lai, D., Lian, Z., Liu, W., Guo, C. Liu, W., Liu, K. y Chen, Q., (2020). A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces, *Science of The Total Environment*, 742, 140092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140092>
- Liu, Z., Li, J., y Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces, *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
- López-Cañedo, J.Y., Rincón-Martínez, J.C., y Fernández Melchor, F. (2021). Estimation of thermal comfort by physical variable of the thermal environment: A study in open spaces at UABC-Sauzal, México, *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 4(2), 58–80. <https://doi.org/10.37636/recit.v425880>
- Manavvi, S. y Rajasekar, E., (2021). Evaluating outdoor thermal comfort in “Haats” – The open air markets in a humid subtropical region, *Building and Environment*, 190, 107527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107527>
- Manavvi, S., y Rajasekar, E. (2022). Evaluating outdoor thermal comfort in urban open spaces in a humid subtropical climate: Chandigarh, India, *Building and Environment*, 209, 108659. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108659>
- Manavvi, S., y Rajasekar, E., (2023). Assessing thermal comfort in urban squares in humid subtropical climate: A structural equation modelling approach, *Building and Environment*, 229, 109931. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109931>
- Marchante, G., & González, A. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico, *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282020000300021&lng=es&tlng=es
- Martín del Campo Saray, F. J., Valladares Anguiano, R., Bojórquez Morales, G., y García Gómez, C. (2020). Development of thermal habitability index in cold period for outdoor public spaces. *Revista De Ciencias Tecnológicas*, 3(3), 145–172. <https://doi.org/10.37636/recit.v33145172>
- Martínez-Bermúdez, E., y Rincón-Martínez, J. C. (2024). Estimación del confort térmico en espacios exteriores: evaluación del periodo frío en Ensenada, Baja California. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 26(2), 151-166. <https://doi.org/10.14718/REVARQ.2024.26.3637>

Monteiro, L., y Alucci, M. (July 2011). Proposal of an outdoor thermal comfort index: empirical verification in the subtropical climate [Conference Paper]. Architecture And Sustainable Development, Proceedings of PLEA 2011, Louvain-la-Neuve, Belgium. https://www.researchgate.net/publication/345855050_Proposal_of_an_outdoor_thermal_comfort_index_empirical_verification_in_the_subtropical_climate

Monteiro, L., y Alucci, M. (29 June - 3 July 2009). Thermal Comfort Index for the Assessment of Outdoor spaces in Subtropical Climates [Conference Paper]. The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan. http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/375911-1-090514092824-005.pdf

Nikolopoulou, M., y Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>

Núñez-de Anda, A., Rincón-Martínez, J.C., Bojórquez-Morales, G., y Llamas-Estrada, A. (2024). Confort higrotérmico en espacios públicos abiertos de clima mediterráneo en periodo de transición térmica, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25(1), 1-12. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2024.25.1.005>

Peng, Y., Feng, T., y Timmermans, H. (2019). A path analysis of outdoor comfort in urban public spaces, *Building and Environment*, 148, 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.023>

Rincón-Martínez J. C., Martínez-Torres, K., González-Trevizo, M. E. y Fernández-Melchor, F (2020). Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C., *Ingeniería Revista Académica, Universidad Autónoma de Yucatán*, 24(1), 1-17. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>

Sarhadi, F., y Rad, V.B. (2020). The structural model for thermal comfort based on perceptions individuals in open urban spaces, *Building and Environment*, 185, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107260>

Tumini, I., y Pérez Fargallo, A. (2015). Aplicación de los sistemas adaptativos para la evaluación del confort térmico en espacios abiertos, en Madrid, *Hábitat Sustentable*, 5(2), 57-67. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1933>