



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

EFFECTO DEL SOMBREADO DE ALINEACIONES DE ÁRBOLES SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA MICROAMBIENTAL Y EL CONFORT TÉRMICO EN MONTEVIDEO

Emilio TERRANI TEXEIRA

Maestría en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

Octubre 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.) Pablo
Speranza, Ing. Agr. (MSc.) Carolina Munka y Arqu. (MSc.) Daniel Sosa
Ibarra, el 01 de Octubre de 2021. Autor/a: Ing. Agr. Emilio Terrani Texeira.
Directora Ing. Agr. Dra. Gabriela Cruz

Dedico este trabajo a los que creemos que el futuro está en amigarse con la naturaleza y no en pretender aislarse de ella.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Ing. Agr. (Dra.) Gabriela Cruz quien desde el inicio se interesó en el proyecto, me brindó su apoyo y nos ensamblamos óptimamente en este proceso.

A la Arq. Alicia Picción y al Ing. Agr. Oscar Bentancur por sus aportes, ayuda y contribuciones esenciales en este proyecto en donde la interdisciplina es la base.

A la Ing. Agr. Gabriela Jolochín por siempre darme para adelante con mis ideas para defender a los árboles y a la Ing. Agr. Carolina Munka por sus aportes.

A ANII y CSIC por el apoyo que fue esencial para dedicarle el tiempo adecuado y realizar este proyecto de forma amena.

Al Cuartel Centenario de Bomberos de la Dirección Nacional de Bomberos, al Museo del Cannabis de Montevideo, al Fondo de Solidaridad y especialmente a las vecinas Mariana, Juliana y Julieta por permitirme colocar los sensores en los domicilios.

Al Dr. Pablo Speranza por su ayuda, interés y dedicación en la elaboración del artículo obtenido de este proyecto.

A la Dra. Gabriela Speroni que me impulsó a realizar la maestría.

A los Valiceros que siempre están presentes.

A mi familia por el apoyo constante.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y CIUDADES	1
1.2 ÁRBOLES ALINEADOS EN LAS CALLES.....	3
1.3 CONFORT TÉRMICO HUMANO	5
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	10
2.1 SITIOS Y MOMENTO DE MUESTREO	10
2.2 MEDICIÓN DEL AMBIENTE FÍSICO	11
2.3 ENCUESTAS	14
2.4 ASOCIACIÓN ENTRE DATOS FÍSICOS Y DE ENCUESTAS	17
2.5 ESTIMACIÓN DEL UTCI.....	17
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	20
3.1 REPRESENTATIVIDAD CLIMÁTICA	20
3.2 MICROAMBIENTE FÍSICO	22
3.3 CONFORT TÉRMICO HUMANO	26
3.3.1. <u>Encuestas</u>	26
3.3.2. <u>Nivel de confort térmico</u>	27
3.3.3. <u>Nivel de confort y categorías de sensación térmica</u>	29
3.3.4. <u>Nivel de confort y categorías de preferencias térmicas</u>	30
3.4 NIVEL DE CONFORT Y VARIABLES MICROAMBIENTALES QUE MEJOR EXPLICAN LOS NIVELES DE CONFORT MANIFESTADOS. ...	32
3.5 COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE SENSACIÓN TÉRMICA OBJETIVA Y UTCI	37

4. <u>CONCLUSIONES</u>	39
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	41
6. <u>ANEXOS</u>	50
6.1 PREFERENCIAS POR VEREDAS ARBOLADAS: ANÁLISIS CRÍTICO DEL CUESTIONARIO	50
6.2 FOTOS DE LAS ESFERAS DE VERNON	51
6.3 FOTOS DE LOS SITIOS	52
6.4 EFFECT OF STREET TREES SHADE ON PERCEIVED THERMAL COMFORT IN A SOUTH TEMPERATE CLIMATE: THE SIDEWALKS OF MONTEVIDEO (URUGUAY)	53

RESUMEN

La integración de vegetación en las ciudades es una de las estrategias más prometedoras para la mitigación y adaptación del cambio climático, además de ser en sí misma una herramienta de acondicionamiento térmico. Los árboles pueden interceptar hasta el 85% de la radiación solar, por lo que el efecto de su sombra puede reducir hasta 19 °C la temperatura del concreto. El “plátano” (*Platanus x acerifolia*), especie que se ha utilizado en muchas ciudades del mundo, constituye el 48% de la población de árboles presentes en el centro de Montevideo. El calor que sienten las personas depende en mayor medida de la temperatura de los objetos del entorno y del grado de insolación, que de la temperatura del aire. El confort térmico humano es la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico, evaluada de forma subjetiva. Por esto, se midió la temperatura en tres calles de Montevideo con tramos arbolados y tramos sin sombra, a través de la colocación de esferas de Vernon durante el verano. A su vez, se realizaron cuestionarios estandarizados a peatones en cada mes estival, para indagar sobre su nivel de confort térmico y al mismo tiempo se relevaron variables físicas instantáneas del sitio. Se comparó el efecto de las alineaciones de árboles sobre las variables físicas y sobre el confort térmico percibido por los peatones. El efecto refrescante local de la sombra de los árboles mejoró el nivel de confort, sus condiciones térmicas de “neutralidad” y eliminó la sensación de “disconfort” por calor extremo. Complementariamente, se realizó un análisis multivariado para identificar asociaciones entre las variables físicas y las respuestas de los encuestados, donde se encontró que el principal efecto de la sombra se asocia a la disminución de la temperatura radiante. También se detectó que algunos aspectos psicológicos de los individuos podrían enmascarar parte del beneficio físico directo de la sombra.

Palabras clave: arbolado urbano, cambio climático, confort térmico exterior, microambiente urbano, percepción térmica

Effect of street trees shade on microenvironmental temperature reduction and on thermal comfort in Montevideo.

SUMMARY

The integration of vegetation in cities is one of the most promising strategies for climate change mitigation and adaptation, in addition to their use in conditioning. Trees can intercept up to 85% of the solar radiation, and thus, their shadow can reduce the temperature of concrete up to 19 °C “London plane” (*Platanus x acerifolia*), specie that has been used in many cities around the world, represents 48% of the population in the downtown area. Trees reduce heat storage and convection from exposed surfaces reducing long wave radiation emission which directly affects people. People’s heat perception depends more on insolation and the temperature of surrounding objects than on air temperature itself. Human thermal comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment, assessed subjectively. For this reason we measured the temperature by placing Vernon globes on three downtown streets of Montevideo which had sections with and without trees on four dates during the summer. Also we performed structured interviews to pedestrians to inquire about their thermal comfort level and at the same time we measured instant physical variables. We compared the effect of tree alignments on physical variables and on pedestrians perceived thermal comfort. The local refreshing effect of tree shade improved people’s comfort level, their thermal conditions of “neutrality” and eliminates the extreme “discomfort” heat sensation. The multi-variable analysis showed that the main effect of shade is on radiant temperature reductions. In addition, some individual’s psychological aspects can mask part of the direct physical effect of shade.

Keywords: thermal comfort, thermal perception, street trees, sidewalks, urban microenvironment.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y CIUDADES

Más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas, incrementándose esta proporción hasta un 80% para América Latina y el Caribe (United Nations, 2014). Específicamente en Uruguay, casi el 40% de la población vive en la capital, la cual tiene una densidad poblacional en el área urbana de 70 hab/ha (IM, 2013, 2018). Gran parte del cambio en el clima que sucederá en las próximas décadas ya ha sido determinado por las emisiones pasadas debido a la inercia del sistema climático (Hulme et al., 2002). Se estima que las ciudades son responsables de la emisión (directa e indirecta) de un 60 a 70 por ciento de los gases de efecto invernadero de origen antropogénico (UN-Habitat, 2011). El cambio climático como resultado de las actividades humanas presenta riesgos para los sistemas humanos y naturales, y por lo tanto en este contexto, surge la necesidad de mitigación y adaptación (IPCC, 2014).

Las ciudades por si mismas conforman un ambiente distinto al natural: el proceso de urbanización modifica la temperatura del ambiente y los procesos hidrológicos, a su vez son ambientes que presentan baja biodiversidad y son productores netos de dióxido de carbono (Whitford et al., 2001). Las edificaciones, construcciones y superficies asfaltadas, conjuntamente con la falta de cobertura vegetal, provocan que los centros urbanos manifiesten mayores temperaturas del aire y de las superficies con respecto a las temperaturas de zonas suburbanas o rurales circundantes, lo cual determina el efecto "Isla de calor urbana" (Kuttler, 2008; Solecki et al., 2005; Wilby, 2003) En Londres se han registrado temperaturas hasta 7 °C superiores en el centro urbano (Wilby, 2003). La forma y magnitud de este

fenómeno varía en tiempo y espacio dependiendo de las características urbanísticas propias de la ciudad y las características meteorológicas y climáticas de su ubicación (Garratt, 1990).

El efecto “Isla de calor urbana” tiene una tendencia a incrementarse con el cambio climático, así como el aumento de las temperaturas y los riesgos de olas de calor, lo cual representa un riesgo para la salud de las personas (Armson et al., 2012; Bowler et al., 2010). Las consecuencias térmicas del cambio climático sobre los humanos han sido subestimadas. Se prevé que los cambios sobre las condiciones bioclimáticas serán mayores que los cambios relacionados específicamente sobre la temperatura del aire. Factores como cambios en la radiación de onda larga y corta serían los principales en tener efecto sobre los cambios en las temperaturas (Matzarakis y Amelung, 2008).

El clima en Uruguay se caracteriza como templado sin una estación seca marcada (*Cfa* según Koppen-Geiger en Peel et al., 2007). Los meses donde se dan las mayores temperaturas (máximas y medias) corresponden a los meses de la época estival, de diciembre a marzo. La temperatura media en el mes más cálido es superior a los 22°C y la máxima media es de 28 °C. Las precipitaciones son constantes a lo largo del año, por lo que no se considera ninguna estación del año como seca (INUMET, 2017; Peel et al., 2007). En Montevideo se observa el efecto isla de calor en la temporada cálida, donde se registran temperaturas mayores en la zonas urbanas con respecto a la zona rural, dejando en evidencia el efecto de la urbanización sobre las temperaturas (Molinari, 2016).

1.2 ÁRBOLES ALINEADOS EN LAS CALLES

El uso de la vegetación en las ciudades es una de las estrategias más prometedoras para la adaptación al cambio climático e involucra también la capacidad de mitigación, además de ser en sí misma una herramienta de acondicionamiento del espacio urbano (Gill et al., 2007; Nowak et al., 1997).

Los árboles en las ciudades proporcionan múltiples beneficios sociales, físicos, biológicos y económicos. Con un adecuado marco de plantación y a gran escala, pueden contrarrestar parte de los efectos adversos que genera el medio urbano, como atemperar el clima y los cambios de temperatura, capturan partículas contaminantes del aire, proporcionan aislación acústica, disminuyen el agua de escorrentía y brindan refugio a la fauna. Modifican el microclima urbano ya que alteran la velocidad del viento, realizan evapotranspiración y sombrean superficies. Inciden positivamente sobre la calidad de vida de las personas facilitando el uso de los espacios libres, la recreación y permitiendo que el medio urbano sea un lugar más agradable para vivir (Nowak et al., 1997).

Los árboles pueden llegar a interceptar hasta un 85% de la radiación solar que incide sobre una fachada (Heisler, 1986) y la temperatura máxima del concreto puede ser reducida hasta 19 °C con su sombra, lo cual provee grandes beneficios refrescando el ambiente local (Armson et al., 2012).

El efecto de los árboles sobre el microclima y ambiente urbano inciden principalmente sobre la temperatura radiante y la velocidad del viento (de Abreu-Harbich et al., 2015). Grupos de árboles proporcionan mayores efectos refrigerantes que árboles individuales. Por otro lado, las alineaciones de árboles proveen un continuo de sombra, donde se vuelven importantes aspectos como la distancia de plantación en relación al diámetro de la copa (de Abreu-Harbich et al., 2015). Existen ciertos principios básicos en cuanto

al diseño del arbolado en calles que permiten potenciar los beneficios que otorgan los árboles. Para regiones templadas y cálidas con estaciones definidas, se recomienda utilizar en general grandes árboles de follaje caduco (interceptan la radiación solar en verano, pero permiten su llegada en invierno), ubicados preferentemente a lo largo de la acera sobre el lado de la calle y con una distancia de plantación que permita generar un dosel continuo con sus copas (Strom, 2007).

Según las especies evaluadas por Sanusi et al. (2017), el “plátano” (*Platanus x acerifolia*) es una de las que provee mayores beneficios microclimáticos sobre las calles en relación a la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, temperatura radiante y velocidad del viento. Esta especie alcanza alturas de entre 15 y 25 m y es de follaje caduco. Se ha utilizado en muchas ciudades del mundo ya que es un árbol de rápido crecimiento, tolerante a la contaminación atmosférica y a la compactación del suelo. La calidad de su madera y su excelente sanidad lo convierten en un árbol muy seguro además de soportar podas intensas. Presenta la desventaja de que sus brotes jóvenes y frutos desprenden pelos pequeños que pueden causar alergias (Grau y Kortsarz, 2012; Valla et al., 2001). Esta especie constituye el 48% de los individuos presentes en los barrios céntricos de Montevideo, más del 86% de los ejemplares en la ciudad poseen diámetros mayores a 40 cm, estos son ejemplares de tamaños que se consideran funcionales en relación a los beneficios que proveen (Richards, 1983; Terrani, 2014). El “plátano” ha demostrado adaptarse correctamente a la ciudad de Montevideo con una buena performance en relación al resto de las especies, considerando también la avanzada edad de los individuos presentes (Terrani, 2014).

En Uruguay, dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, se menciona el enverdecimiento de zonas urbanas como medida para estabilizar la temperatura y combatir el efecto “isla de calor”, al mismo

tiempo que captura dióxido de carbono. Otro ítem menciona evaluar el potencial y eficacia en función de costos de las opciones basadas en ecosistemas, áreas verdes y silvicultura urbana (MVOTMA, 2018).

1.3 CONFORT TÉRMICO HUMANO

El confort térmico es uno de los principales factores que influye sobre las personas al momento de realizar actividades al aire libre y para el uso de los espacios públicos en la ciudad (Guzmán y Ochoa, 2014). El confort térmico humano es aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico evaluada de forma subjetiva. Las variaciones fisiológicas y psicológicas varían ampliamente de persona a persona, lo cual dificulta encontrar un ambiente que satisfaga a todos los individuos. Los principales factores que inciden son: la tasa metabólica, vestimenta, temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del viento y humedad relativa.

Índices como “Universal Thermal Climate Index” (UTCI) o “Physiological Equivalent Temperature” (PET) se pueden determinar a partir de variables físicas y así estimar las condiciones térmicas exteriores para las personas. En ese sentido, por ejemplo, la temperatura del aire que recibe la mayor aceptación en relación al nivel de confort, se encuentra en el entorno de los 20 °C y 25,8 °C dependiendo del tipo de clima evaluado (ASHRAE, 2013; Guzmán y Ochoa, 2014; Jendritzky et al., 2012; Mayer y Höppe, 1987; Rosenzweig et al., 2006; Sanusi et al., 2017; Wilson et al., 2008). El nivel de confort está relacionado con la sensación térmica, ya que una persona que no siente ni frío ni calor, estaría térmicamente confortable. La sensación térmica es una percepción consciente, usualmente graduada con categorías como: frío, fresco, algo fresco, neutral, algo cálido, cálido y caluroso (ASHRAE, 2013).

El UTCI evalúa las condiciones térmicas exteriores para aplicarlas en biometeorología humana, como pronósticos, alertas, planeamiento e impacto relacionado al clima. Se basa en modelar la respuesta termo-fisiológica humana a partir del modelo termoregulatorio multinodal "Fiala". El modelo considera la adaptación conductual de las personas en relación a su vestimenta según la temperatura ambiental y a su vez su distribución en las distintas partes del cuerpo, proporcionando valores según los distintos segmentos. A su vez, también considera el efecto del viento y del movimiento de la persona, sobre la reducción de la resistencia térmica y evaporativa de la ropa. El índice proporciona lo que se denomina "temperatura equivalente", así, se obtiene un valor para una determinada combinación de velocidad de viento, radiación, humedad relativa y temperatura del aire, en relación a un índice obtenido en un entorno de referencia y que produciría el mismo nivel de estrés térmico (Jendritzky et al., 2012).

La sombra que generan los árboles sobre las superficies disminuye el almacenamiento y convección del calor desde éstas y conjuntamente la emisión de calor por radiación de onda larga, que afecta directamente a las personas. Es así que el calor que sienten las personas depende en mayor medida de la temperatura de los objetos del entorno y del grado de insolación, que de la temperatura del aire (Monteith y Unsworth, 2013). En verano durante el día, la sombra de los árboles disminuye el UTCI al influir sobre la temperatura radiante media, y así reducir el nivel de estrés térmico de las personas (Coutts et al., 2016). Por otro lado, si bien no se observan diferencias significativas sobre la "temperatura fisiológica equivalente" (PET) como estimación de confort entre distintas especies de árboles, en todos los casos las calles arboladas mejoran el confort térmico de los transeúntes (Sanusi et al., 2017).

Las personas recurren a la adaptación física para vincularse con el ambiente térmico y sus requerimientos, pero la adaptación psicológica es un factor importante que influye en la percepción subjetiva y el disfrute del ambiente de los espacios exteriores (Thorsson et al., 2004). La adaptación física y psicológica de las personas son aspectos complementarios a tener en cuenta, ya que considerarlos de forma conjunta aumentaría el uso de los espacios exteriores, brindando mejores oportunidades y reforzando así la interacción social de los ciudadanos (Nikolopoulou y Steemers, 2003).

Si bien los elementos microclimáticos y fisiológicos tienen gran influencia en la sensación térmica de los individuos, éstos solo representan aproximadamente el 50% de la variación que se encuentra entre evaluaciones de confort objetivas y subjetivas. La adaptación psicológica explicaría el resto (naturalidad, expectativas, experiencias, tiempo de exposición, control percibido, estímulo ambiental), en relación a como las personas se ajustan al ambiente térmico para evitar estar en discomfort (Nikolopoulou y Steemers, 2003).

Habitualmente se utilizan variables microclimáticas para inferir sobre el confort térmico de las personas en espacios exteriores. Los trabajos que indagan directamente sobre las percepciones y preferencias térmicas de los usuarios de manera subjetiva, en general están centrados en espacios públicos con características y fines específicos como plazas y parques, que cumplen funciones recreativas principalmente. Las veredas en las zonas céntricas de las ciudades son sitios mayormente funcionales para permitir el tránsito de peatones, donde la posibilidad de “elegir” distintos microambientes para lograr una adaptación al ambiente térmico es limitada. Todas las primaveras es tema de discusión pública los inconvenientes que genera la fructificación de los “plátanos” en la ciudad de Montevideo, motivando la idea de que su extracción sería la solución, sin contraponer los aspectos positivos de esta especie.

Esta investigación parte de la hipótesis que la sombra del arbolado viario reduce la temperatura microambiental y mejora el confort térmico de las personas que hacen uso de la vía pública.

Definiendo como objetivo general:

- Analizar el efecto y contribución del sombreado del arbolado viario en la ciudad de Montevideo sobre la reducción de la temperatura microambiental y el confort térmico humano.

Y como objetivos específicos:

- Medir el efecto del sombreado del arbolado viario en la reducción de la temperatura microambiental en relación a tramos de calle sin arbolado, considerando la especie *Platanus x acerifolia*.
- Analizar la contribución del sombreado del arbolado en la mejora del confort térmico percibido por las personas que hacen uso de los espacios públicos a evaluar.
- Estimar las asociaciones existentes entre las variables físicas del confort y las variables de percepción de los usuarios en relación al aporte del arbolado en contrarrestar los efectos adversos de las altas temperaturas.

Con este propósito se midieron variables físicas y se realizaron entrevistas estructuradas en tres calles céntricas de Montevideo, con tramos arbolados y sin arbolado durante un verano. Así, a través de medidas objetivas del ambiente físico y de los efectos percibidos por las personas, se pretende evidenciar los beneficios sobre el ambiente térmico que las alineaciones de esta especie proveen mejorando su nivel de confort durante toda la época

estival que es cuando se combinan e intensifican los efectos negativos de las altas temperaturas y del fenómeno isla de calor. Reafirmando que el arbolado constituye una poderosa herramienta para el desarrollo de una ciudad resiliente frente al cambio climático.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 SITIOS Y MOMENTO DE MUESTREO

Se seleccionaron tres calles céntricas de la ciudad de Montevideo a modo de repeticiones, cada una con tramos arbolados y tramos sin sombra. Los tramos de calles seleccionados fueron: Mercedes (-34.9010107,-56.1791337 y -34.901842, -56.181094), J. E. Rodó (-34.903173, -56.168797 y -34.903004, -56.166710) y Durazno (-34.9097937,-56.1765968 y -34.909817, -56.175308). Todas tienen un trazado predominantemente este-oeste y se encuentran en el municipio B, segundo en densidad de población, con 128 habitantes por hectárea y con una proporción de un árbol en alineación cada 9 personas (Terrani, 2014). Se utilizaron las aceras orientadas al sur para las mediciones, ya que son las que reciben el asoleamiento. Si bien el perfil de construcciones varía entre 9 y 30 m de altura en esas calles, se verificó que las edificaciones del entorno a los sitios de mediciones no superaran la altura de los árboles y no proyectaran sombra sobre la vereda sur. El ancho de la calzada en las calles de estudio tiene un rango de 9 a 11 m y las veredas de 3 a 4 m. El pavimento de las calles es asfalto y las veredas son de baldosas de hormigón utilizadas habitualmente en Montevideo.

La especie alineada en los tramos arbolados corresponde al “plátano” (*Platanus x acerifolia*), ejemplares coetáneos, adultos y desarrollados. Sus diámetros oscilan dentro de un rango de 43 a 97 cm y su altura entre 11 y 20 m, su estado sanitario general es bueno. Las alineaciones generan un dosel continuo entre sus copas y están plantados a una distancia promedio de 17 m de separación entre individuos, sobre la vereda, entre el espacio de circulación peatonal y la calle. El manejo recibido en cuanto a poda es el que se utiliza habitualmente en Montevideo para el mantenimiento de ejemplares

de estas características, denominado “desbrote”. Es el mantenimiento básico para evitar interferencias con cartelería, vehículos y peatones, sin afectar el dosel superior ni la estructura del ejemplar (Terrani, 2014). Este manejo no difiere entre las distintas calles. En esta etapa se utilizó el Sistema de Información Geográfico de la Intendencia de Montevideo (IM), la prestación Google Street View de Google Maps y se realizó una evaluación in situ de las calles que fueron previamente seleccionadas en gabinete.

2.2 MEDICIÓN DEL AMBIENTE FÍSICO

Se colocaron seis esferas de Vernon tradicionales en tres sitios sombreados y tres en sitios a pleno sol. Este instrumento consiste en una esfera de cobre de 15 cm de diámetro, hueca, pintada exteriormente de color negro mate y con un termómetro en su interior (Bedford y Warner, 1934; Thorsson et al., 2007b). Se instalaron sobre fachada con orientación Norte (lo que corresponde a la acera sur), de forma de asegurar el asoleamiento y el menor sombreado de las propias construcciones. Para evitar el hurto de los equipos, estos fueron colocados a una altura de entre 5 y 16 m, que corresponde a la segunda planta de las edificaciones. Esto implica que los registros se tomaron aproximadamente entre 3,3 y 14,3 m por arriba de la altura media de un peatón. Los sensores utilizados en su interior (TagTemp-S NFC portable data logger) se configuraron para registrar la temperatura (T globo) dentro de la esfera cada 1 hora desde diciembre de 2018 hasta marzo de 2019. También se registró con termómetro infrarrojo y un termoanemómetro medidas instantáneas de temperatura de superficies (T fachada, T vereda y T calle), temperatura del aire (T aire) y velocidad del viento (V viento) al momento de realizar las encuestas en los sitios donde se instalaron las esferas.

Las alineaciones de árboles en los sitios bajo sombra tienen una configuración “ideal” (Figura 1) según lo que se recomienda para ciudades

de clima templado como Montevideo: son árboles de gran porte, de follaje caduco y se encuentran plantados en el espacio entre la calle y la acera, a una distancia tal que se genera un dosel continuo entres sus copas (Strom, 2007).

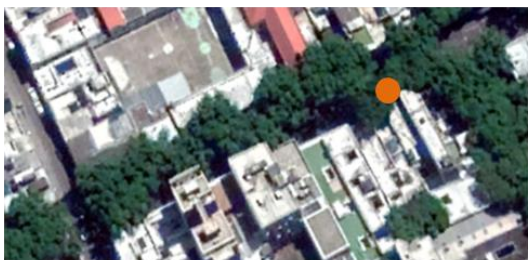
Tramos arbolados	Tramos sin sombra
Calle Mercedes -34.9010107, -56.1791337 	-34.901842, -56.181094 
Calle J. E. Rodó -34.903173, -56.168797 	-34.903004, -56.166710 
Calle Durazno -34.9097937, -56.176596 	-34.909817, -56.175308 
● Ubicación de la esfera	

Figura 1 Sitios de medición. Fuente: elaboración propia.

Para la caracterización meteorológica del verano 2018-2019 y la comparación con las normales climatológicas se utilizaron los datos de la

estación meteorológica Carrasco (-34.8328 -56.0126) proporcionados por INUMET (2020).

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con 3 bloques que corresponden a cada una de las calles, dentro de las cuales cada una recibe tratamiento “sombra”, que corresponde a los tramos sombreados por árboles y por otro lado los tramos de referencia, sin sombra. Se asume diferencia entre calles y homogeneidad dentro de las calles (entre los tramos arbolados y sin arbolado para una misma calle). En la práctica, no es viable la asignación del tratamiento de forma aleatoria, pero dadas las características del experimento (tiempo en el que la alineación logra desarrollarse para lograr la estructura deseada), se puede asumir que este fue asignado aleatoriamente. Por último, no habría interacción bloque por tratamiento, ya que la especie, el manejo recibido, el perfil de construcciones y la orientación son similares. Para el procesamiento y análisis de los datos de temperatura obtenidos de las esferas se utilizó un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) considerando el componente estacional ARIMA (2, 0, 0) (2, 0, 0)₂₄, que se expresa a continuación:

$$y_t = \beta_0 + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \Phi_1 y_{t-24} + \Phi_2 y_{t-48} - \phi_1 \Phi_1 y_{t-25} - \phi_2 \Phi_1 y_{t-26} \\ - \phi_1 \Phi_2 y_{t-49} - \phi_2 \Phi_2 y_{t-50} + w_t$$

Con $w_t \sim N(0; \sigma^2)$

Modelo ajustado:

$$\hat{Y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\phi}_1 y_{t-1} + \hat{\phi}_2 y_{t-2} + \hat{\Phi}_1 y_{t-24} + \hat{\Phi}_2 y_{t-48} - \hat{\phi}_1 \hat{\Phi}_1 y_{t-25} - \hat{\phi}_2 \hat{\Phi}_1 y_{t-26} \\ - \hat{\phi}_1 \hat{\Phi}_2 y_{t-49} - \hat{\phi}_2 \hat{\Phi}_2 y_{t-50}$$

y_t : Temperatura predicha

β_0 : Constante del modelo

$\phi_1 y_{t-1}$: Temperatura una hora antes

$\phi_2 y_{t-2}$: Temperatura dos horas antes

$\hat{\Phi}_1 y_{t-24}$: Temperatura 24 horas antes

$\hat{\Phi}_2 y_{t-48}$: Temperatura 48 horas antes

$\hat{\phi}_1 \hat{\Phi}_1 y_{t-25}$: Temperatura 25 horas antes

$\hat{\phi}_2 \hat{\Phi}_1 y_{t-26}$: Temperatura 26 horas antes

$\hat{\phi}_1 \hat{\Phi}_2 y_{t-49}$: Temperatura 49 horas antes

$\phi_2 \Phi_2 y_{t-50}$: Temperatura 50 horas antes

w_t : Error

2.3 ENCUESTAS

Se encuestó mensualmente a las personas que circulaban o se encontraron en la vereda (transeúntes) de las tres calles seleccionadas, durante las horas de mayores temperaturas (11:00 a 16:00 h), en días despejados y de viento calmo, durante la época estival (21/12/2018, 21/01/2019, 18/02/2019 y 28/03/2019). Se recabó información a través de un cuestionario estandarizado y con un muestreo de tipo “subjetivo por decisión razonada”. En este tipo de muestreo, las unidades de la muestra se eligen en relación a alguna de sus características, como por ejemplo, estar caminando por una calle sombreada. Se usa cuando la muestra es muy limitada y se quiere evitar oscilaciones casuales que distancien la muestra de las características de la población que se quiere estudiar (Corbetta, 2007). Los individuos (exceptuando niños) fueron elegibles solo por el hecho de circular o encontrarse en el sitio seleccionado al momento del muestreo sin hacer distinción por edad, sexo o ninguna otra característica percibida. Quedaron

por fuera aquellas personas que no estuvieron dispuestas a ser encuestadas o aquellas que pasaron en el mismo momento que había una encuesta en curso. Durante cada día seleccionado, se encuestaron 5 personas por sitio (30 en total), que fue el número máximo para poder realizar durante el horario estipulado, de forma que todas se hicieran el mismo día y por lo tanto los encuestados se encontraran bajo condiciones similares.

El cuestionario de confort térmico exterior utilizado para las encuestas se basó en las categorías propuestas por ASHRAE (2013) y tomó aspectos planteados por Thorsson et al. (2007a). Se constituyó principalmente con preguntas y respuestas estandarizadas tomando como referencia un cuestionario elaborado previamente por Vázquez et al. (2018). Se relevaron en primer lugar las propiedades sociodemográficas básicas y aspectos específicos de los individuos: sexo, edad, peso y vestimenta (Figura 2). En segundo lugar se hicieron preguntas relativas a su comportamiento: la actividad que estaba realizando al momento que se inició la encuesta y durante los últimos 15 minutos previos (Figura 2). Se hicieron preguntas relativas a actitudes, donde se indagó sobre la sensación térmica actual del individuo según una escala de 7 niveles: *muy frío, frío, levemente frío, neutral, levemente caluroso, caluroso, muy caluroso* (Figura 2). Seguidamente se consultó sobre las preferencias térmicas en ese momento también según escalas de 7 niveles; *mucho más frío, más frío, un poco de frío, igual, un poco de calor, más calor, mucho más calor*. Por último, se preguntó acerca del grado de confort con una escala de 3 niveles: *confortable, aceptable, discomfort* (Figura 2)

Temp. del aire	Vel. del viento	Temp. calle	Temp. vereda	Temp. fachada

CUESTIONARIO DE CONFORT TÉRMICO EXTERIOR

Fecha		Sexo		Edad	
Hora		Peso	1	2	3
Ubicación		Ocupación			

Vestimenta:

Superior 1. Remera s/mangas 2. Remera m/corta 3. Remera m/larga 4. Buzo 5. Campera
 Inferior 1. Bermuda, Falda 2. Pantalón largo
 Calzado 1. Cerrado 2. Abierto

Qué actividad está haciendo en este momento:

a. Sentado b. De pie c. Caminando d. Ejercicio

1. a. Vive en el barrio b. Trabaja en el barrio c. Ninguna

1.2 Si vive en el barrio, que percepción tiene de la calle:

Sombria	Fresca	Calma
Luminosa	Calurosa	Ventosa

2. Actividad de los últimos 15 minutos

Interior	Sol
Exterior	Sombra

Respecto a su actual sensación térmica

3. En este momento está sintiendo:

Muy frío	Frío	Levemente frío	Neutral, ni frío ni calor	Levemente caluroso	Caluroso	Muy caluroso
----------	------	----------------	---------------------------	--------------------	----------	--------------

4. En este momento, preferiría estar sintiendo:

Mucho más frío	Más frío	Un poco de frío	Igual, sin cambios	Un poco de calor	Más calor	Mucho más calor
----------------	----------	-----------------	--------------------	------------------	-----------	-----------------

5. Respecto a los siguientes parámetros meteorológicos, preferiría que estuviesen:

Temperatura del aire	Más baja	Como está	Más alta	No sé qué decir
Humedad del aire	Más seco	Como está	Más húmedo	No sé qué decir
Velocidad del viento	Más débil	Como está	Más fuerte	No sé qué decir
Radiación solar	Más débil	Como está	Más fuerte	No sé qué decir
Carga de calor de los alrededores	Más débil	Como está	Más fuerte	No sé qué decir

6. En este momento estoy:

Confortable	Aceptable	En discomfort
-------------	-----------	---------------

7. Le gustan las ciudades arboladas?

☐ Sí ☐ No

8. Hay árboles en la calle donde vive?

☐ Sí ☐ No

y frente a su casa?

☐ Sí ☐ No

8.1. En caso negativo, le gustaría que hayan árboles en la vereda de su casa?

☐ Sí ☐ No

Figura 2. Cuestionario de confort térmico exterior. Fuente: elaboración propia.

2.4 ASOCIACIÓN ENTRE DATOS FÍSICOS Y DE ENCUESTAS

Para interpretar el vínculo entre los datos físicos (objetivos) y de percepción de los individuos (subjetivos) se utilizó la plataforma “Partition” del programa “JMP” (Salvatore y Reagle, n.d.-b). Esta metodología identifica los subgrupos de variables X (variables objetivas) que mejor predicen el resultado Y (grado de confort y preferencias térmicas) contemplando todas las variables medidas y generando un árbol de decisión con aquellas variables que mejor explican las respuestas de las personas. Así, se realizan sucesivas particiones que van conformando un “árbol de decisión” hasta alcanzar un ajuste con significación estadística. Para lograr el ajuste se utiliza el criterio de “máxima significancia” para realizar las particiones, estas se conforman a partir del cálculo de un valor de significancia para cada una. Este valor de significancia se denomina “LogWorth” y es el logaritmo negativo del *p*-valor ajustado ($\text{LogWorth} = -\log_{10}(\text{p-value})$) (Salvatore y Reagle, n.d.-b).

2.5 ESTIMACIÓN DEL UTCI

Para el cálculo de la temperatura equivalente del UTCI se utilizó la ecuación de regresión disponible en www.utci.org. Los datos que requiere el índice son: temperatura del aire (T_{aire}) en °C, diferencia (ΔT_{mrt}) entre la temperatura radiante media (T_{mrt}) y la temperatura del aire, humedad relativa (HR%) y velocidad del viento (V_{viento}) a 10 m. Se calculó la temperatura equivalente para cada encuestado a partir de las medidas instantáneas tomadas al momento de realizar la encuesta y de los registros de las esferas de Vernon en cada sitio. Para la humedad relativa se utilizaron los datos de la estación meteorológica Carrasco ya que no se contó con el instrumento de medida para realizar las mediciones instantáneas. En relación a esto, se asume que podría haber variaciones entre los datos de humedad relativa del aire registrado en la estación

meteorológica y el sitio de medición, aunque entendemos que las diferencias serían mínimas y que las variables velocidad del viento y temperatura radiante serían las que más inciden en las diferencias encontradas entre sitios (Niu et al., 2015). La humedad relativa tiene poca influencia sobre el índice UTCI en climas áridos (Zare et al., 2018). En climas similares a Uruguay, en relación al resto de las variables, la humedad relativa es la variable que menos impacta sobre el confort de las personas (Huang et al., 2020; Li et al., 2020), por lo que no se esperarían grandes diferencias en los resultados finales del índice.

La temperatura radiante media se calculó a partir de la fórmula propuesta en ASHRAE (2001) como sigue:

$$\vec{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_v^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

Donde

$\vec{t}_r$ = temperatura radiante media, °C

t_g = temperatura de globo, °C

V_v = velocidad del viento, m/s

t_a = temperatura del aire, °C

D = diámetro de la esfera, m

ε = emisividad (0,95 para esfera negro mate)

La velocidad del viento fue medida a una altura de 2 m y el índice requiere que este dato corresponda a una altura de 10 m, para estimarlo se aplicó el factor de escala propuesto por Bröde et al. (2012):

$$V_{v10} = V_{v xm} \times \log\left(\frac{10}{0.01}\right) \div \log\left(\frac{x}{0.01}\right)$$

Donde

V_{v10} = velocidad del viento a 10 m de altura, en m/s

$V_{v xm}$ = velocidad del viento medida a x metros de altura, en m/s

x = altura en la cual la velocidad del viento fue medida (2,1 m)

Una vez obtenidos los valores de temperatura equivalente, se asociaron a la escala de categorías de estrés según el siguiente cuadro por Bröde et al. (2012):

Cuadro 1 Temperatura equivalente UTCI en categorías de estrés térmico

Rango UTCI (°C)	Categoría de estrés
46 o más	Estrés por calor extremo
38 a 46	Estrés por mucho calor
32 a 38	Estrés por calor
26 a 32	Estrés por calor moderado
9 a 26	Sin estrés térmico (confort térmico-neutralidad)
9 a 0	Estrés por algo de frío
0 a -13	Estrés por frío moderado
-13 a -27	Estrés por frío
-27 a -40	Estrés por mucho frío
-40 o menos	Estrés por frío extremo

Finalmente, se asociaron las categorías obtenidas a partir del índice con las categorías de sensación térmica que respondieron los encuestados. La categoría “sin estrés térmico” representa la situación de confort o neutralidad térmica de los encuestados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 REPRESENTATIVIDAD CLIMÁTICA

Para verificar que el verano de estudio está comprendido dentro de los rangos que indica la climatología y por lo tanto que el experimento transcurrió bajo condiciones representativas, se realizaron comparaciones de los registros meteorológicos del período de estudio con las normales climáticas.

Cuadro 2 (ver p21) Comparación de los registros meteorológicos (medias mensuales) para el período diciembre 2018 – marzo 2019 con las normales climatológicas 1981-2019, diferencia entre mes más cálido y más frío de la serie con los meses de estudio y registros para los días de encuestas (21/12/2018, 21/01/2019, 18/02/2019 y 28/03/2019).

Datos de la estación meteorológica Carrasco (-34.8328 -56.0126) de INUMET (2020)

Diciembre						
	Climático (1988-2019)	Dif. (climático - más cálido)	Dif. (climático - más frío)	2018	Dif.	21 de 2018
TMED (°C)	21	-3	2	21	0	23
TXM (°C)	26	-4	2	25	1	X
TNM (°C)	16	-2	2	16	0	X
TX (°C)	40	0	7	32	8	27
TN (°C)	7	-3	0	8	-1	19
HR (%)	70	6	3	70	0	82
V (kn)	9	1	-1	9	0	5

Enero						
	Climático (1988-2019)	Dif. (climático - más cálido)	Dif. (climático - más frío)	2019	Dif.	21 de 2019
TMED (°C)	23	-1	2	23	0	23
TXM (°C)	27	-2	3	27	0	X
TNM (°C)	18	-1	1	19	-1	X
TX (°C)	39	0	8	35	4	29
TN (°C)	10	-3	-1	12	-3	16
HR (%)	71	6	-5	75	-4	69
V (kn)	9	x	x	9	0	7

Febrero						
	Climático (1988-2019)	Dif. (climático - más cálido)	Dif. (climático - más frío)	2019	Dif.	18 de 2019
TMED (°C)	22	-2	2	22	0	25
TXM (°C)	27	-2	3	27	0	X
TNM (°C)	18	-2	1	17	1	X
TX (°C)	38	3	7	34	3	30
TN (°C)	8	-5	-3	11	-3	19
HR (%)	73	-7	-1	69	4	71
V (kn)	8	0	x	7	1	8

Marzo						
	Climático (1988-2019)	Dif. (climático - más cálido)	Dif. (climático - más frío)	2019	Dif.	28 de 2019
TMED (°C)	21	-2	2	20	1	20
TXM (°C)	25	-1	2	24	1	X
TNM (°C)	16	-3	3	16	0	X
TX (°C)	35	0	5	33	2	25
TN (°C)	7	-6	-1	10	-3	14
HR (%)	75	-7	1	76	-2	72
V (kn)	8	-1	1	7	1	8

Temperatura media del aire (TMED), promedio de temperatura máxima del aire (TXM), promedio de temperatura mínima del aire (TNM), temperatura máxima absoluta del aire (TX), temperatura mínima absoluta del aire (TN), promedio humedad relativa (HR), promedio de velocidad del viento en 24 h (V).

Las temperaturas en el período de estudio fueron representativas para la época según las normales climatológicas tomando como referencia la estación meteorológica de Carrasco (-34.8328 -56.0126). Las medias fueron de 21 °C en diciembre, 23 °C en enero, 22 °C en febrero y 20 °C en marzo, valores consistentes con las medias históricas, apartándose solo un grado por debajo para el mes de marzo. Las máximas medias (TXM) se comportaron de igual forma, sólo apartándose en un grado menos para los meses de diciembre y marzo del año de estudio. La humedad relativa y la velocidad media del viento también fueron representativas en relación a los registros históricos (Cuadro 2).

Según Wilson et al., (2008) en general las personas prefieren estar a la sombra cuando la temperatura del aire es superior a 24,5 °C. Las temperaturas máximas medias en Uruguay para para la época estival se encuentran por encima de este valor, así como también para los meses de diciembre, enero y febrero, del período de estudio. A su vez, si analizamos la temperatura máxima alcanzada los días de las encuestas, en todas las instancias se superó este valor (Cuadro 2).

3.2 MICROAMBIENTE FÍSICO

Los árboles tuvieron un efecto significativo sobre el ambiente físico. Se estimaron las diferencias entre sitios (sol y sombra) para cada hora a partir de los valores predichos por el modelo, luego los días se agruparon según las diferencias máximas de temperatura y se obtuvo el número de días que

registraron diferencias en cada rango máximo. Se observaron diferencias significativas durante al menos una hora en la temperatura registrada por las esferas entre los tramos de calle sombreados y los tramos sin sombra en 114 de los 117 días registrados (Cuadro 3). Por otro lado, más del 60% de los días corresponden a diferencias de entre 8 y 12 °C. A su vez, la diferencia máxima de temperatura se registró en tres ocasiones siendo entre 14 y 15 °C (Cuadro 3). Esta diferencia es superior a la encontrada por Armson et al., (2012) en Manchester, que registró reducciones de entre 5 y 7 °C en la temperatura de la esfera.

Cuadro 3. Número de días en donde se encontraron diferencias de al menos una hora en la temperatura registrada por la esfera (°C) entre tratamientos (sol/sombra) según mes. A partir de valores predichos para las 3 calles, (P<0,05).

	diciembre	enero	febrero	marzo	Total
Sin diferencia	1	2			3
Dif. < 1 °C	1	2		2	5
Dif. ≥ 1, < 2 °C		1		1	2
Dif. ≥ 2, < 3 °C			1		1
Dif. ≥ 3, < 4 °C			1		1
Dif. ≥ 4, < 5 °C	2	4	1	1	8
Dif. ≥ 5, < 6 °C	3	2		2	7
Dif. ≥ 6, < 7 °C	2	1	2	1	6
Dif. ≥ 7, < 8 °C	2	2		3	7
Dif. ≥ 8, < 9 °C	3	3	2	6	14
Dif. ≥ 9, < 10 °C	4	6	9	6	25
Dif. ≥10, < 11 °C	5	4	5	4	18
Dif. ≥11, < 12 °C	4	4	4	2	14
Dif. ≥12, < 13 °C			1		1
Dif. ≥13, < 14 °C			1	1	2
Dif. ≥14, < 15 °C			1	2	3
Total días	27	31	28	31	117

Para los días en que se realizaron las encuestas, las esferas ubicadas al sol registraron una diferencia de más de 9 °C en relación a las ubicadas a la sombra en diciembre, febrero y marzo. La diferencia en el día de enero fue de más de 8 °C. A su vez, el registro de las esferas en los tramos a la

sombra es más estable y con menos oscilaciones que los sitios sin sombra (Figura 3) donde se atemperan las variaciones de temperatura. Esto último queda evidenciado con la abrupta caída de temperatura que se percibe en los registros al sol durante algunas horas puntuales (Figura 3: “a” hora 14:00, “b” hora 16:00, “c” horas 11:00 y 13:00) lo cual se atribuye al pasaje de nubosidad. Por otro lado, las diferencias observadas entre las temperaturas registradas en cada día se alinean con lo que describen las medias mensuales (Cuadro 2) del período diciembre 2018 – marzo 2019 según los registros meteorológicos. Donde efectivamente los meses más cálidos fueron enero y febrero, y por otro lado en marzo, las temperaturas son notoriamente más bajas.

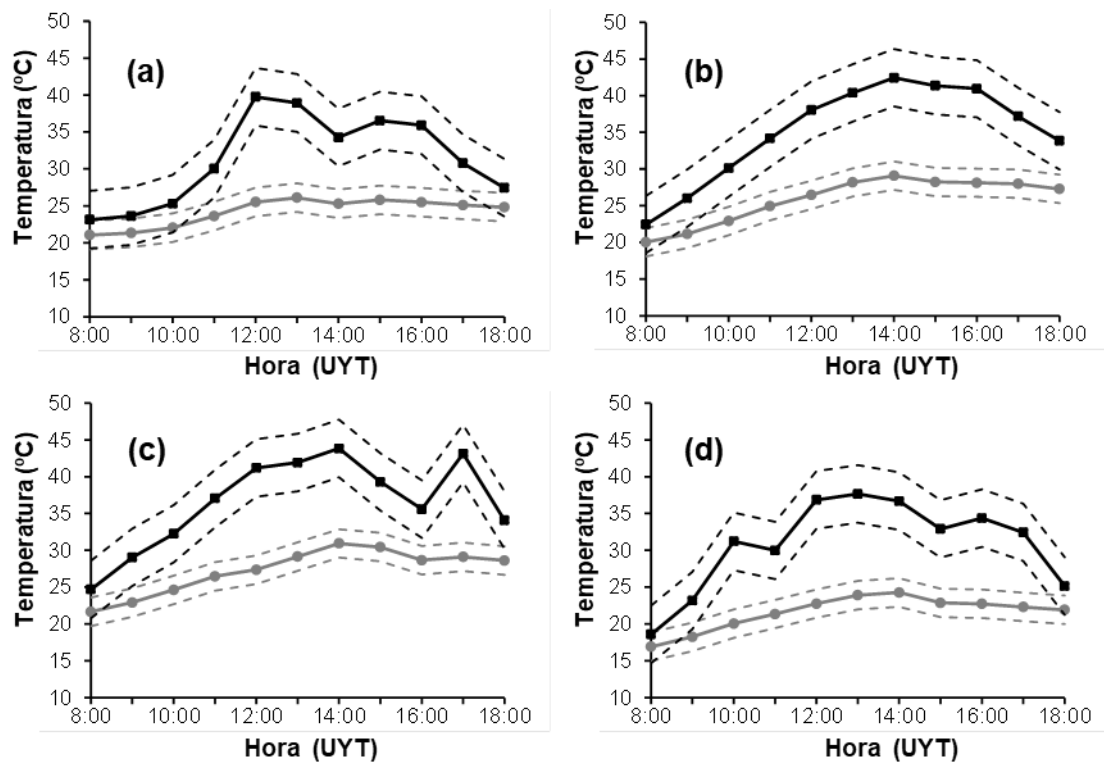


Figura 3 Variación de la temperatura de la esfera con límite superior (Ls) y límite inferior (Li) (líneas punteadas), al sol (cuadrados negros) y bajo sombra (puntos grises). Valores predichos (para las 3 calles) para las fechas 21/12/2018 (a), 21/01/2019 (b), 18/02/2019 (c) y 28/03/2019 (d), ($P < 0,05$).

Una persona en un ambiente sombreado se sentirá más fresca que si se encuentra directamente bajo el sol, aunque la temperatura del aire sea la misma (considerando fijo el resto de los factores) (Monteith y Unsworth, 2013). En ese sentido, la temperatura registrada por las esferas se utilizó como referencia ya que es una de las variables que se utiliza para estimar la temperatura radiante media la cual es afectada mayormente por el sombreado de los árboles (Armson et al., 2012; ASHRAE, 2001). La temperatura radiante media está vinculada a la temperatura de los objetos del entorno y al grado de insolación, los cuales son factores que influyen en mayor medida sobre el calor que sienten las personas.

3.3 CONFORT TÉRMICO HUMANO

3.3.1 Encuestas

Las preguntas relacionadas a la percepción del ambiente térmico son preguntas relativas a actitudes, las cuales pueden acarrear respuestas imprecisas y ambiguas y llevar a los encuestados a dar respuestas de carácter normativo (Corbetta, 2007). Por tal motivo, el cuestionario en primer lugar indaga sobre sensación térmica y preferencias para finalizar consultando en relación al grado de confort. Así, primeramente se pregunta sobre aspectos concretos y específicos dejando evidencia para contrastar luego la coherencia con las respuestas generales de nivel de confort. En ese sentido, el confort térmico humano implica un estado de satisfacción con el ambiente térmico (ASHRAE, 2013), por lo que los grupos que manifestaron estar confortables, efectivamente están compuestos mayoritariamente por personas que no manifestaron preferir ningún cambio térmico en ese momento. Esto garantiza que aquellas personas que contestaron estar confortables, efectivamente percibían estar en esa situación.

3.3.2 Nivel de confort térmico

En la Figura 4 se observa correspondencia entre los indicadores físicos (sol o sombra) y el nivel de confort. En primer lugar se evidencia que el total de los encuestados que manifestaron estar en disconfort se encontraban en sitios al sol. Por otro lado, para las fechas de diciembre, febrero y marzo, la proporción de encuestados que manifestaron estar en confort en los tramos con sombra es más del doble en relación a los tramos sin sombra. La frecuencia de encuestados que manifestaron estar en una situación aceptable son similares para las fechas de diciembre y febrero para ambos tratamientos, sin embargo, esta relación varía en enero y marzo. En la fecha del mes de enero, no se mantiene la relación de “confortables” entre tratamientos en relación al resto de los meses, pero aumenta la proporción de “aceptables” a la sombra, en lugar de permanecer constante (Figura 4). En sentido contrario, en la fecha de marzo, es donde se observa la mayor proporción de individuos “confortables” en sitios sombreados, llevando a la baja la proporción de “aceptables”, la cual varía en relación a los sitios al sol.

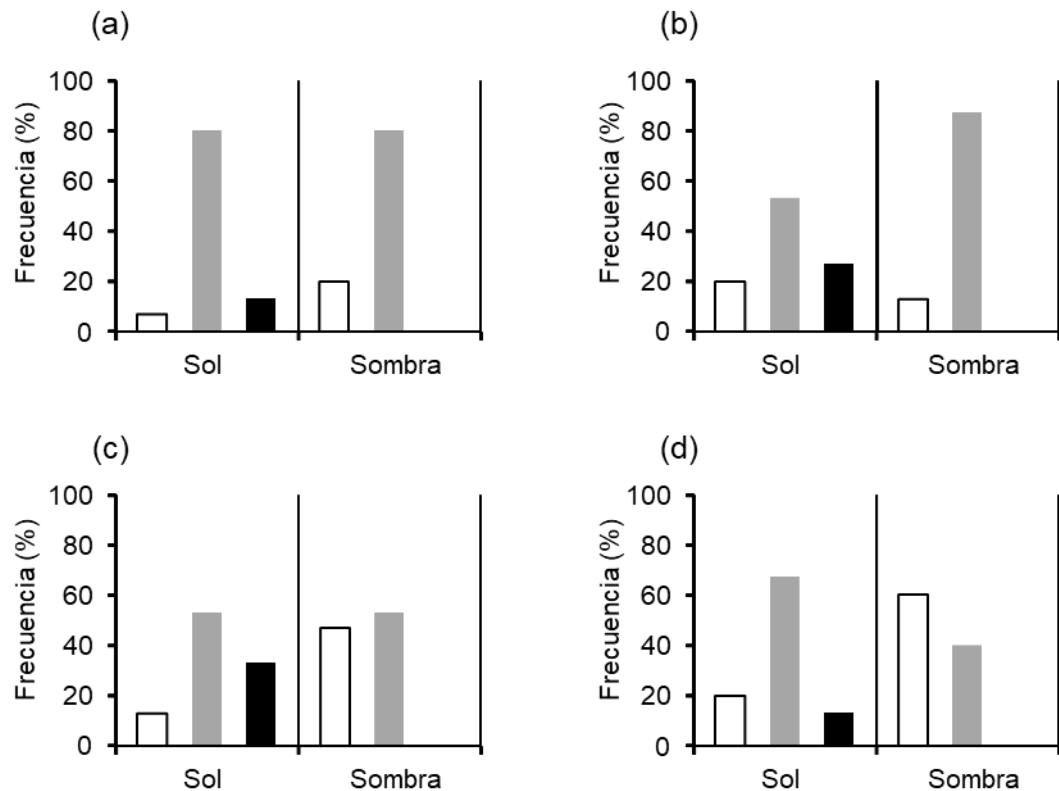


Figura 4 Nivel de confort expresado por los encuestados “confortable” (blanco), “aceptable” (gris), “en disconfort” (negro) (porcentaje de frecuencia) bajo tratamientos (sol/ sombra), para las fechas 21/12/2018 (a), 21/01/2019 (b), 18/02/2019 (c) y 28/03/2019 (d).

La temperatura media del aire registrada en la estación meteorológica para los días de las encuestas está por encima de los 20 °C (Cuadro 2) lo que puede tomarse como valor referencia por ser la temperatura del aire que en general recibe mayor aceptación en relación al nivel de confort exterior para ciudades de clima templado como Mánchester (GB), pero con temperaturas medias más bajas en relación a Montevideo para la época cálida (Köppen, 1918; Wilson et al., 2008). Por otro lado, Guzmán y Ochoa (2014) observaron que la temperatura “neutra” de confort se encuentra a los 25,8 °C para la ciudad de Nogales (MX), que presenta un clima seco y templado y

que durante el período cálido las medias de temperatura registradas fueron de 30 °C. Las encuestas fueron realizadas durante las horas de máximas temperaturas del aire, donde se registraron en esos días, máximas de 27 °C en diciembre, 29 °C en enero, 30 °C en febrero y 25 °C en marzo, por lo que el disconfort térmico manifestado se asocia a las altas temperaturas.

3.3.3 Nivel de confort y categorías de sensación térmica

Se observa incomodidad por calor bajo ambos tratamientos, sin embargo, las categorías más extremas de “calor” son más frecuentes en los sitios sin sombra. A su vez, todas las personas que respondieron estar en disconfort previamente declararon estar sintiendo algún nivel de “calor” en ese momento (Figura 5), lo cual confirma lo interpretado en la Figura 4 en relación a que la incomodidad manifestada al momento de responder sobre el nivel de confort se debe al calor.

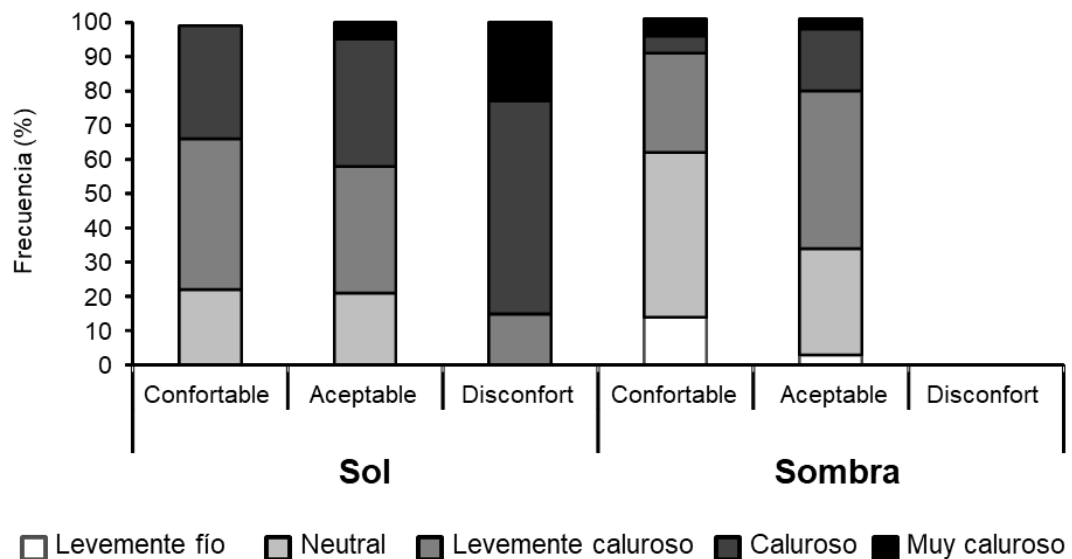


Figura 5 Sensación térmica expresada por los encuestados (frecuencia en porcentaje) dentro de grupos de confort, bajo tratamientos (sol/sombra)

Por otro lado, las frecuencias de “neutralidad” se duplican a la sombra en relación a sitios sin sombra. A la vez, dentro de la categoría “confortable” con sombra, las proporciones de personas sintiendo algún nivel de calor son menores que en los sitios sin sombra. En general, el nivel de confort percibido por los encuestados aumenta en sitios sombreados, apoyando las mejoras térmicas encontradas por Sanusi et al., (2017) al obtener índices de confort a partir de variables del microambiente físico, donde se encontró que todas las especies analizadas redujeron el nivel de estrés térmico estimado por PET en relación a sitios sin cobertura. Así como menciona Armson et al., (2012), los árboles tienen un rol significativo en la mejora del confort térmico en ciudades. A su vez, al considerar las respuestas de sensación térmica “neutral” y “levemente frío” encontradas dentro de la categoría de confort “aceptable” bajo sombra (Figura 5), se interpreta que el efecto de los árboles es aún mayor que el obtenido sólo por las respuestas de confort, ya que sensaciones térmicas así, se esperarían encontrar dentro del grupo “confortable”.

3.3.4 Nivel de confort y categorías de preferencias térmicas

Para terminar el análisis e interpretación de las respuestas de confort manifestadas, se indagó sobre las preferencias térmicas de los usuarios al momento de la encuesta, de manera de verificar la coherencia entre las distintas respuestas.

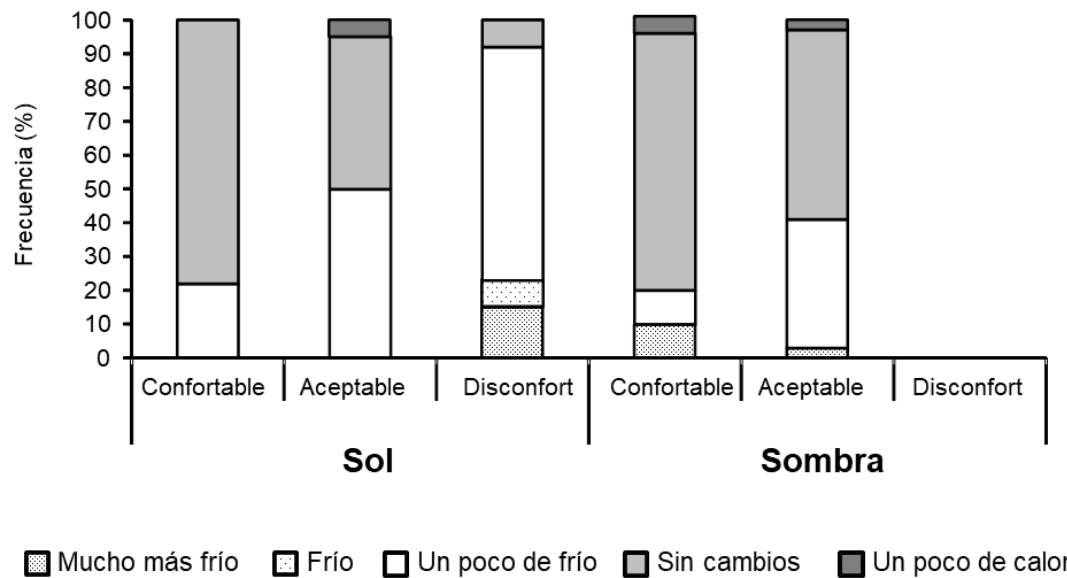


Figura 6 Preferencias térmicas expresadas por los encuestados (frecuencia) dentro de grupos de confort, bajo tratamientos (sol/sombra)

Al comparar los grupos que manifestaron estar “confortables” bajo ambos tratamientos, los individuos que manifestaron no preferir ningún cambio térmico en ese momento conforman más del 75% del total de los individuos dentro de esos grupos (Figura 6). Esto permite confirmar que la mayor parte de las personas que declararon sentirse “confortables”, efectivamente se sentían en satisfacción con el ambiente térmico al no preferir sentir más calor o más frío (ASHRAE, 2013; Guzmán y Ochoa, 2014). Al comparar estos grupos bajo ambos tratamientos, la situación que presenta mayores proporciones de personas que manifestaron no preferir ningún cambio sobre el ambiente térmico son aquellas personas que se encontraba en tramos sombreados. En días cálidos, sitios sombreados proporcionarían mayores condiciones que permiten que las personas no sientan la necesidad de modificar algún aspecto de su situación térmica, ya que se sienten cómodos (neutralidad térmica), al no sentir ni frío ni calor (Guzmán y Ochoa, 2014).

Por último, en relación a la categoría “aceptable”, podría estar enmascarando otros niveles de confort debido al fenómeno de aquiescencia: *“...tendencia de los entrevistados a elegir las respuestas que expresan acuerdo, a dar contestaciones afirmativas más que negativas...”* (Corbetta, 2007). La tendencia a responder “aceptable” bajo ambos tratamientos (sol/sombra) donde independientemente de la situación en concreto, la mayor parte de los encuestados tendió a responder “aceptable” (Figura 4) siendo quizás este estado, no representativo de su situación. Esto último explicaría aquellas personas que respondieron estar “confortables” o “aceptables” habiendo manifestado una sensación térmica de “caluroso” o “muy caluroso” (Figura 5). Por otro lado, se asume que aquellos individuos que efectivamente respondieron estar “neutrales” o “algo calurosos”, pero que luego manifestaron estar aceptables como nivel de confort (Figura 4 y Figura 5), se encuentran en realidad “confortables”. Verificando esto y analizando el confort térmico, se puede decir que la frecuencia de personas en confort bajo sombra se duplica, en relación a las que se encuentran en sitios al sol y, aunque representando bajas frecuencias generales, ciertos individuos encontraron cómodos los ambientes sin sombra y no preferirían ningún cambio.

3.4 NIVEL DE CONFORT Y VARIABLES MICROAMBIENTALES QUE MEJOR EXPLICAN LOS NIVELES DE CONFORT MANIFESTADOS

Con el objetivo de encontrar las asociaciones existentes entre las variables físicas del microambiente y las respuestas subjetivas de confort y sensación térmica, se realizó un análisis multivariado para obtener “árboles de decisión”. Para esto se procesaron todas las variables propias de las personas (sexo, edad, peso, vestimenta, actividad) conjuntamente con las variables físicas medidas para el ambiente térmico (T globo, T aire, T fachada, T calle, T vereda y V viento).

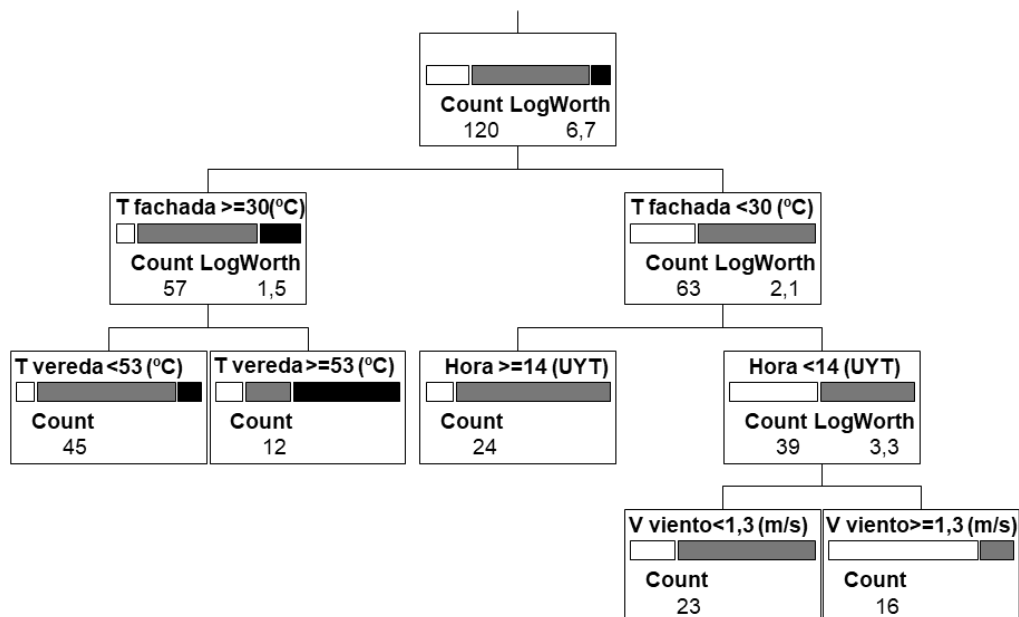


Figura 7 Árbol de decisión según nivel de confort expresado por los encuestados, “confortable” (blanco), “aceptable” (gris), “en discomfort” (negro) ($P < 0,05$, $LogWorth < 1,3$)

La primer división quedó definida por la temperatura de fachada ($T_{fachada}$), agrupando todos los individuos en “discomfort” dentro de un grupo con temperaturas registradas en fachadas superiores a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego, dentro de este mismo grupo, la temperatura de vereda (T_{vereda}) es la segunda variable en reagrupar. Dentro del grupo de personas encuestada con temperatura de fachada menor a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la variable que divide es el momento del día (hora) en que la encuesta fue realizada y por último la velocidad del viento (V_{viento}) (Figura 7). Las variables físicas asociadas a la temperatura radiante (la cual se vincula a la temperatura de los objetos del entorno), son las que más inciden sobre el grado de confort que manifiestan las personas y las que determinan en primer orden su nivel de confort (ASHRAE, 2013; Guzmán y Ochoa, 2014). Debido a que en condiciones de gran calentamiento de la superficie la temperatura disminuye rápidamente con la

altura, si las esferas se hubieran instalado a la altura del peatón, este efecto podría ser aún mayor. Sin embargo, por razones de seguridad estas fueron instaladas varios metros por encima de la altura media de una persona (ver materiales y métodos) lo cual podría atenuar parte del efecto de las variables físicas asociadas a la temperatura radiante que influyen sobre las persona. Avanzando sucesivamente en el árbol de decisión, las divisiones parten de variables del ambiente físico y no se encuentran asociaciones con variables propias de los individuos.

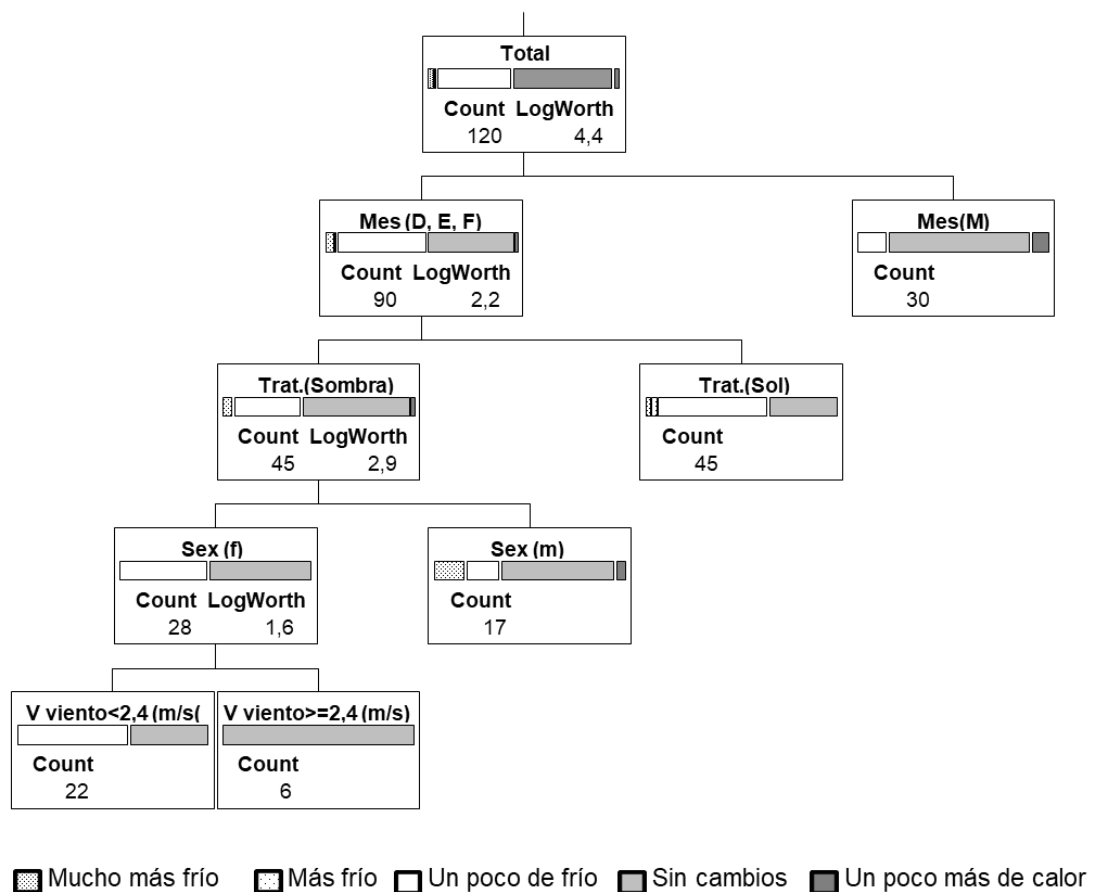


Figura 8 Árbol de decisión según preferencia térmica expresada por los encuestados ($P < 0,05$, $\text{LogWorth} < 1,3$).

Al considerar las preferencias térmicas como variable de respuesta, surge en la primera división la variable “mes” como determinante para los dos primeros grupos. El mes de marzo genera un grupo aparte, donde se observa que la mayor parte de los encuestados no hubiese preferido ningún cambio térmico en ese momento. Para el grupo que surge a partir de los tres meses restantes (diciembre, enero y febrero) la primera división se da por “tratamiento”, es decir personas que se encontraban en sitios con sombra o aquellos que se encontraban en sitios sin sombra. Aquí, los sitios sombreados forman un grupo nuevamente donde la mayor parte de los encuestados no hubiese preferido ningún cambio térmico. Dentro de este grupo se observan pequeñas diferencias que surgen de la variable “sexo” (Figura 8).

En este caso, a diferencia de lo que ocurre en la Figura 7, los factores decisivos para los grupos involucran otros aspectos además de exclusivamente las variables microclimáticas físicas, como por ejemplo el mes o el tratamiento de forma global. Es así, que algunos aspectos vinculados a la adaptación psicológica estarían quedando a la vista al analizar este árbol de decisión. Las personas perciben el ambiente de diferente forma y responden a los estímulos ambientales dependiendo de la “información” que posean de la situación en particular y no en relación directa a la magnitud de las variables físicas (Nikolopoulou y Steemers, 2003).

Por ejemplo las “*expectativas*” que implica cómo debería ser el ambiente térmico, en lugar de cómo realmente está (Nikolopoulou y Steemers, 2003). Se espera pasar calor en el verano ya que es la temporada cálida. En ese sentido, muchos encuestados se encuentran sin preferir ningún cambio térmico en los meses más cálidos (diciembre, enero y febrero) a pesar que las temperaturas son considerablemente superiores a lo que se esperaría para que un individuo se sienta confortable (Guzmán y Ochoa, 2014; Wilson

et al., 2008). Entonces, las personas están predispuestas a que las temperaturas van a ser elevadas en esos meses y son capaces de tolerarlas. Pero a su vez, otro gran grupo preferiría sentir un poco de frío, lo cual deja en claro que sienten calor y un ambiente más fresco les permitiría alcanzar el nivel de neutralidad, lo que se identifica en el segundo nivel del esquema. Los sitios al sol son aquellos donde los individuos más reclaman la preferencia por un ambiente más fresco, habiendo una mayor aceptación del ambiente en sitios con sombra.

En enero, mes habitualmente más cálido, la tendencia de las proporciones de individuos que contestaron estar “confortables” bajo ambos tratamientos no se mantiene. Esto lleva a pensar que quizás por un lado en este mes las personas están predispuestas a pasar calor, y por otro si bien la cantidad de “aceptables” aumenta a la sombra, quizás el efecto de la sombra de los árboles sobre la temperatura microambiental no alcanza a contrarrestar totalmente las altas temperaturas y así permitir a las personas lograr la neutralidad térmica y por lo tanto estar confortables.

Por último, en marzo, donde las temperaturas son inferiores y más cercanas a lo que se espera para alcanzar confort térmico, gran proporción de los individuos no hubiese preferido ningún cambio, y por lo tanto podemos decir que se encontraron confortables, acompañándose a las temperaturas de la época. En este mes la proporción de personas confortables a la sombra se triplica en relación a sitios con sol (Figura 4), lo que deja en evidencia la contribución de la sombra con temperaturas menos extremas.

3.5 COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE SENSACIÓN TÉRMICA OBJETIVA Y UTCI

Se utilizó el índice UTCI como referencia para evaluar las condiciones térmicas exteriores a partir de datos del microambiente físico y contrastar las categorías de “temperatura equivalente” obtenidas, con las respuestas subjetivas de las personas. Contrastar el índice con los resultados de percepciones de sensaciones térmicas de las personas, permite evaluar su adaptabilidad al ambiente urbano de Montevideo como índice de referencia para pronósticos, alertas o planeamiento en relación al clima.

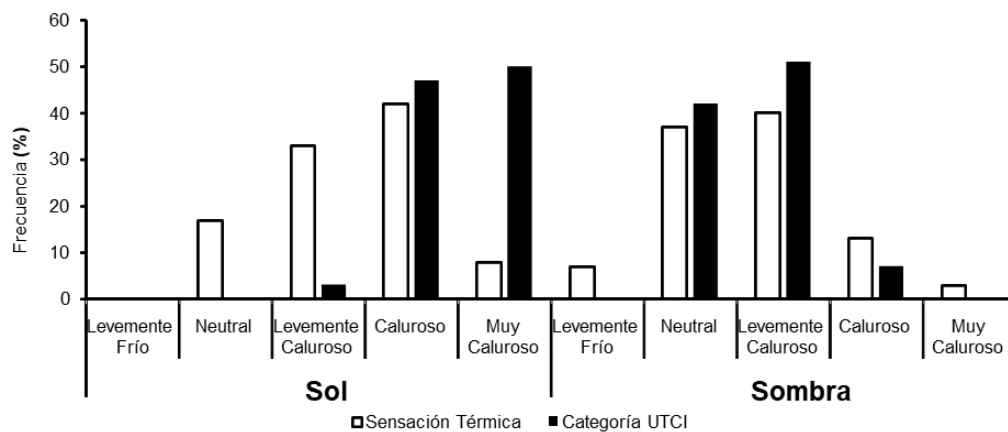


Figura 9 Sensación térmica expresada por los entrevistados según categoría UTCI obtenida con variables físicas

Las categorías de estrés térmico obtenidas a partir del UTCI para los tramos sin sombra agrupan a los individuos en categorías de estrés por calor extremo, que corresponderían a “estrés por calor” y “estrés por mucho calor” según la escala de Bröde et al. (2012) (Figura 9). En los tramos sombreados, el índice deriva mayoritariamente en categorías sin estrés térmico (confort térmico o neutral) o con un estrés por calor moderado, alineado con la tendencia de las respuestas de los encuestados en tramos a la sombra, así como menciona Martini (2013)

Sin embargo, al comparar las respuestas subjetivas de sensación térmica en tramos sin sombra con las categorías UTCI, se observan que las proporciones están desplazadas (Figura 9). El índice sobrestimaría el nivel de estrés térmico bajo esas condiciones, ya que los individuos no definen su situación térmica a niveles tan extremos. Resultados similares fueron encontrados por Vázquez et al., (2018). Incluso como se mencionó anteriormente, algunos individuos declararon estar “neutrales” en tramos sin sombra, situación que el índice no considera según los valores arrojados de temperatura equivalente (Cuadro 1). Así, como menciona Rossi (2012) para la ciudad de Curitiba, el índice subestima la cantidad de personas que declaran estar en confort, en este caso específicamente para los tramos sin sombra. Poblaciones que viven en climas distintos manifiestan actitudes diferentes en relación a exponerse al sol, según las características culturales y el contexto climático al que están acostumbrados (Thorsson et al., 2007a). La capacidad de adaptación al clima de un sitio sería uno de los factores que permiten a las personas encuestadas en estos ambientes sentirse en condiciones térmicas menos extremas en relación a lo que se esperaría partiendo de las variables físicas, lo cual indica la necesidad de calibrar el índice a condiciones locales.

4. CONCLUSIONES

Durante el verano, en la ciudad de Montevideo se alcanzan temperaturas que superan los niveles en los que las personas se sentirían térmicamente cómodas. Sin embargo, la sombra que genera el arbolado viario reduce la temperatura microambiental (registrada en las esferas) durante todo el período estival, con diferencias de hasta 14°C en relación a los sitios sin sombra. En más de la mitad de la temporada, estas diferencias están en el rango de 8 a 12 °C.

El sombreado de los árboles mejora el nivel de confort térmico de las personas. Permite a los individuos alcanzar condiciones de neutralidad térmica más fácilmente y por otro lado, elimina la sensación extrema de “disconfort” por calor. El efecto “refrescante” de los árboles está presente no solo en condiciones de calor extremo, el beneficio que significa este efecto fue percibido por las personas durante los cuatro meses de estudio.

El principal efecto de la sombra sobre el confort de las personas se relaciona con la disminución en los valores de las variables asociadas a la temperatura radiante. Sin embargo, al analizar las respuestas según grupos de preferencias, surgen variables que involucran aspectos del contexto global y no vinculadas únicamente a la temperatura radiante. Como por ejemplo la predisposición a enfrentar altas temperaturas en ciertos meses que permitiría una mayor tolerancia al calor en las personas, y podría estar enmascarando parte del efecto físico directo de la sombra. Por otro lado, las mejores condiciones que proporcionarían las calles arboladas, no solo por su efecto directo sobre la temperatura radiante sino también por significar espacios más agradables, influirían positivamente en los aspectos psicológicos que afectan el nivel de confort.

La capacidad de adaptación de las personas a condiciones térmicas más extremas y por fuera de los rangos en los cuales se esperaría encontrar confort térmico se visualiza en los resultados que predice el índice UTCI en sitios sin sombra. En estos sitios, el índice sobrestima el nivel de estrés térmico cuando se lo compara con las respuestas subjetivas de los usuarios. Sin embargo, en sitios sombreados el índice UTCI es coherente con las respuestas de sensación térmica subjetiva de los encuestados.

Las alineaciones de árboles constituyen una herramienta en la mejora microambiental de calles en ciudades de clima templado donde el efecto de las altas temperaturas de la temporada estival significa un factor de discomfort. Influyen positivamente sobre el microambiente, aumentando el nivel de confort percibido por las personas, lo cual significa una mejora de su calidad de vida. Esta contribución se vuelve aún más valiosa frente al contexto que plantea el cambio climático para los ambientes urbanos, donde el uso de vegetación se vuelve una necesidad en la gestión de los espacios públicos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Armson D, Stringer P, Ennos, AR. 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(3), 245–255.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). 2013. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en:

https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_55-2013

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). 2001. ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals. Ashrae Standard, 53(9), 1689–1699.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Bedford T, Warner CG. 1934. The globe thermometer in studies of heating and ventilation. *Journal of Hygiene*, 34(4), 458–473.

<https://doi.org/10.1017/S0022172400043242>

Bowler DE, Buyung-Ali L, Knight TM, Pullin AS. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence.

Landscape and Urban Planning, 97(3), 147–155.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmé I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G. 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*,

56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

Corbetta P. 2007. Metodología y Técnicas de Investigación Social. Cap.5: La encuesta por muestreo. Madrid: McGraw-Hil.146-204.

Coutts AM, White EC., Tapper NJ, Beringer J, Livesley SJ. 2016. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. Theoretical and Applied Climatology, 124(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>

de Abreu-Harbich LV, Labaki LC, Matzarakis A. 2015. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. Landscape and Urban Planning, 138, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>

Garratt JR. 1990. Boundary layer climates. Earth-Science Reviews, 27(3), 265. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(90\)90005-g](https://doi.org/10.1016/0012-8252(90)90005-g)

Gill SE, Handley JF, Ennos AR, Pauleit S. 2007. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure LK -. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: <https://slc.on.worldcat.org/oclc/123729317>. Built Environment. TA - TT -, 33(1), 115–132.

Grau A, Kortsarz A. 2012. Las especies de árboles de Tucumán. In A. Levy (Ed.), Guía de arbolado de Tucumán. Salta, AR, Artes Gráf, pp. 109–229.

Guzmán F, Ochoa J. 2014. Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos, Clima cálido y frío semi-seco. Hábitat Sustentable, 4(2), 52–

63.

Heisler GM. 1986. Energy savings with trees. *Journal of Arboriculture*. 12 (5): 113-125., 12(5), 113–125.

Huang CH, Tsai HH, Chen HC. 2020. Influence of weather factors on thermal comfort in subtropical urban environments. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12052001>

Hulme M, Jenkins G, Lu X, Turnpenny J, Mitchell T, Jones R, Lowe J, Murphy J, Hassell D, Boorman P, McDonald R, Hill S. 2002. Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report. Tyndall Centre for Climate Change Research. The UKCIP02 Scientific Report, April, 120. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: http://www.ukcip.org.uk/wordpress/wp-content/PDFs/UKCIP02_tech.pdf

IM. (Intendencia de Montevideo). 2018. Estrategia De Resiliencia. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/estrategia-de-resiliencia-de-montevideo.pdf>

IM (Intendencia de Montevideo). 2013. Informe Censos 2011 : Montevideo y Área Metropolitana Índice general [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/informe_censos_2011_mdeo_y_area_metro.pdf

INUMET (Instituto Uruguay de Meteorología). 2020. Estadísticas climatológicas. [Datos sin publicar].

INUMET (Instituto Uruguay de Meteorología). 2017. Estadísticas climatológicas. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: <http://www.meteorologia.com.uy/ServCli/tablasEstadisticas>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. In Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es.pdf

Jendritzky G, de Dear R, 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>

Köppen W. 1918. Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle. Petermanns Geogr. Mitt, 64(1918), 193–203.

Kuttler W. 2008. The urban climate--basic and applied aspects. Urban Ecology, 233–248.

Li J, Zhao L, Peng Z, Wang Z, Shui T. 2020. Study on Outdoor Thermal Comfort in the Transitional Season of Hefei. E3S Web of Conferences, 165, 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016501026>

Martini A. 2013. Microclima e Conforto Térmico Proporcionado pelas Árvores de Rua na Cidade de Curitiba - PR. Dissertação Engenharia Forestal

Universidade Federal Do Paraná, 129.

Matzarakis A, Amelung B. 2008. Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. *Advances in Global Change Research*, 30, 161–172.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6877-5_10

Mayer H, Höppe P. 1987. Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49.
<https://doi.org/10.1007/BF00866252>

Molinari M. 2016. Caracterización de la evolución del efecto isla de calor en la ciudad de Montevideo. Montevideo, Uruguay. *Espacio Interdisciplinario e la Universidad de la República*. 11p.

Monteith J, Unsworth M. 2013. *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/C2010-0-66393-0>

MVOTMA (Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial). 2018. Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Plan Nacional de Adaptación de Ciudades e Infraestructuras (NAP Ciudades). [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: mvotma.gub.uy/component/k2/item/10011027-sintesis-de-nap-ciudades

Nikolopoulou M, Steemers K. 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)

- Niu J, Liu J, Lee T, Lin ZJ, Mak C, Tse K, Tang B, Kwok KCS. 2015. A new method to assess spatial variations of outdoor thermal comfort: Onsite monitoring results and implications for precinct. *Building and Environment*, 91, 263-270.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.017>
- Nowak DJ, Dwyer JF, Childs G. 1997. Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. In: Nascimento, J. R.; Krishnamurthy, L. eds. *Áreas verdes urbanas en latinoamérica y el caribe*. Mexico, Banco Interamericano de Desarrollo. pp. 17-38.
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Richards NA. 1983. Diversity and stability in a street tree population. *Urban Ecology*, 7(2), 159–171. [https://doi.org/10.1016/0304-4009\(83\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0304-4009(83)90034-7)
- Rosenzweig C, Solecki W, Parshall L, Gaffin S, Lynn B, Goldberg R, Cox J, Hodges S. 2006. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. 86th AMS Annual Meeting.
- Rossi F. 2012. Proposição de metodologia e de modelo preditivo para avaliação da sensação térmica em espaços abertos em Curitiba Universidade Tecnológica Federal do Paraná. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/311>
- Salvatore D, Reagle D. 2008. *Statistics and Graphics Guide*. Cary, NC, USA. SAS Institute Inc.

- Sanusi R, Johnstone D, May P, Livesley SJ. 2017. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 157, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>
- Solecki WD, Rosenzweig C, Parshall L, Pope G, Clark M, Cox J, Wiencke M. 2005. Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 6(1), 39–49.
- Strom S. 2007. Urban and Community Forestry: Planning and Design. *Urban and Community Forestry in the Northeast*, 99–117. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8_6
- Terrani E. 2014. Evaluación de la estructura y comportamiento del arbolado urbano de Montevideo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 112 p.
- Thorsson S, Honjo T, Lindberg F, Eliasson I, Lim EM. 2007a. Thermal comfort and outdoor activity in Japanese urban public places. *Environment and Behavior*, 39(5), 660–684. <https://doi.org/10.1177/0013916506294937>
- Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, Holmer B. 2007b. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1983–1993. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>
- Thorsson S, Lindqvist M, Lindqvist S. 2004. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology*, 48(3), 149–156.

<https://doi.org/10.1007/s00484-003-0189-8>

UN-Habitat (United Nations). 2011. Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas. In Informe Mundial Sobre Asentamientos Humanos. Earthscan. [En Línea]. Julio 2020. Disponible en: <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Las Ciudades Y El Cambio Climático Orientaciones Para Políticas.pdf>

United Nations. 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). In *New York, United*. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>

Valla JJ, Saenz A, Rivera SM, Jankowski LS, Bazzano D. 2001. Árboles urbanos 2. Buenos Aires. Biota Rioplatense VI, LOLA. 320 p.

Vázquez D, Alvaríño S, Picción A, Cruz G. 2018. Estimación del confort térmico humano en espacios al aire libre. Montevideo, Uruguay. Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República. 16 p.

Whitford V, Ennos AR, Handley JF. 2001. "City form and natural process" - Indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57(2), 91–103. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00192-X)

Wilby RL. 2003. Past and projected trends in London's Urban heat island. *Weather*, 58(7), 251–260. <https://doi.org/10.1256/wea.183.02>

Wilson E, Nicol F, Nanayakkara L, Ueberjahn-Tritta A. 2008. Public urban open space and human thermal comfort: The implications of alternative climate change and socio-economic scenarios. *Journal of*

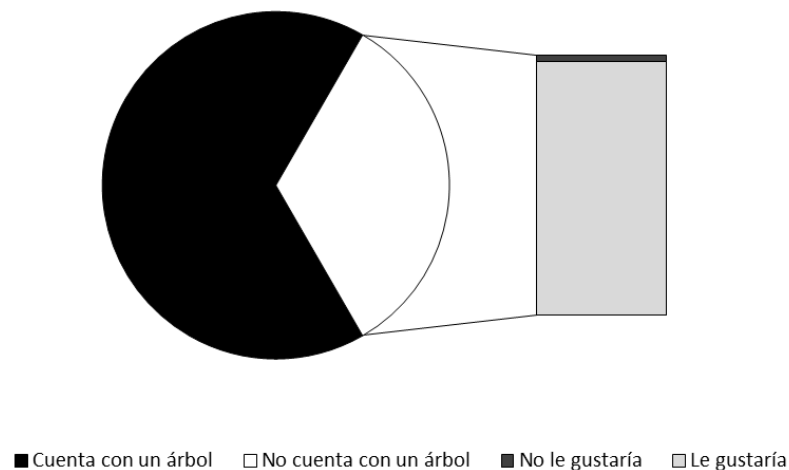
Environmental Policy and Planning, 10(1), 31–45.

<https://doi.org/10.1080/15239080701652615>

Zare S, Hasheminejad N, Shirvan HE, Hemmatjo R, Sarebanzadeh K, Ahmadi S. 2018. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather and Climate Extremes*, 19(August 2017), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>

6. ANEXOS

6.1 PREFERENCIAS POR VEREDAS ARBOLADAS: ANÁLISIS CRÍTICO DEL CUESTIONARIO



El 67% de los encuestados respondió contar con un árbol en la vereda de su casa, y dentro de la proporción restante, que no cuenta con un árbol, el 99% le gustaría contar con uno. A su vez, el 98% de los encuestados respondió preferir que la ciudad sea arbolada. Con respecto a esta sección del cuestionario, Corbetta (2007) señala “...una pregunta que el 90% de los encuestados responden igual, suele ser una pregunta inútil...” En ese sentido, estas proporciones pueden desprenderse de respuestas genéricas, superficiales, que se rigen principalmente por normas sociales y no representan la opinión real del encuestado, a su vez, también se vincula con el fenómeno de “aquiescencia” mencionado anteriormente, donde los entrevistados tienden a dar respuestas que están en acuerdo más que en desacuerdo. De algún manera, está “bien visto” responder que se prefieren

espacios arbolados, aunque quizás no sea lo que realmente la persona piense subjetivamente sobre los árboles.

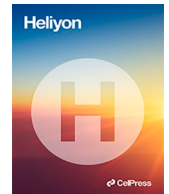
En relación a esto último, esta tesis está enmarcada en un programa de maestría en donde los cursos y el proyecto de investigación se desarrollan conjuntamente, y en muchos casos, la oferta de cursos y los momentos en que se dictan, no condicen con la etapa del proceso de investigación. En ese sentido, algunos cursos que se tomaron, permitieron visualizar metodologías y procedimientos, que quizás se hubiese planteado de otra forma en el proyecto, si el curso se tomara previamente al planteo y ejecución del proyecto.

6.2 FOTOS DE LAS ESFERAS DE VERNON



6.3 FOTOS DE LOS SITIOS

Tramos arbolados	Tramos sin sombra
Calle Mercedes	
	
Calle J. E. Rodó	
	
Calle Durazno	
	



Research article

Effect of street trees shade on perceived thermal comfort in a south temperate climate: The sidewalks of Montevideo (Uruguay)

Emilio Terrani^a, Alicia Picción^b, Oscar Bentancur^c, Gabriela Cruz^{a,*}^a Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. E. Garzón 780, Montevideo, 12900, Uruguay^b Departamento de Clima y Confort, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Bulevar General Artigas 1031, Montevideo, 11200, Uruguay^c Departamento de Biometría, Estadística y Computación, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. E. Garzón 780, Montevideo, 12900, Uruguay

ARTICLE INFO

Keywords:

Climate change
Multivariable analysis
Thermal physical parameters
Thermal perception
Urban microenvironment

ABSTRACT

The use of vegetation in cities is one of the most promising strategies for urban climate change adaptation and mitigation. Tree shade influences heat storage from surfaces reducing long wave radiation emission which directly affects people. People's heat perception depends more on insolation and the temperature of surrounding objects than on air temperature itself. There is a need for analyzes that include the combined effects of physical and human variables on thermal comfort, as well as location-based studies to address its climatic and social conditions. In order to compare the effect of the trees on microenvironmental temperature and perceived thermal comfort, we measured physical parameters and performed structured interviews on three downtown streets of Montevideo, Uruguay, which had sections with and without trees on four dates during the summer. Generally, people surveyed under both treatments stated they did not feel fully comfortable due to summer heat, but the proportion of people who stated feeling in thermal comfort under tree shade was more than double than the unshaded sections.

The seasonal ARIMA analysis supported that the tree shade reduced the microenvironmental temperature by its effect on radiant temperature. By using a statistical decision tree methodology that combines all the variables in the same analysis, we found a greater impact of physical variables than personal variables on people's thermal comfort and thermal preferences. We also identified gender as a significant variable that affects people's thermal preferences, where 46.4 % of females preferred a slightly colder environment.

1. Introduction

1.1. Street trees

The use of vegetation in cities is one of the most promising strategies for urban climate change adaptation and mitigation, in addition to urban space conditioning. Cities are responsible for 60–70 % of the anthropogenic greenhouse gases emissions. The present climate change has already been determined by past emissions and climate system inertia [1,2]. The thermal consequences may have been underestimated: bioclimatic conditions will be more stressful and these changes will be greater than the ones related to

* Corresponding author.

E-mail address: gcruz@fagro.edu.uy (G. Cruz).<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32762>

Received 30 June 2023; Received in revised form 5 June 2024; Accepted 7 June 2024

Available online 14 June 2024

2405-8440/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

air temperatures. This whole context leads humans to look for mitigation and adaptation strategies [3,4]. Buildings, concrete, and asphalt surfaces combined with lack of vegetation cover cause higher air and higher surface temperatures in urban centers than in their surrounding suburban or rural areas. Trees can intercept up to 85 % of the solar radiation, and thus, their shadow can reduce concrete temperature up to 19 °C [5–7]. Tree groups provide greater cooling effects than individual trees. Street alignment design must consider basic principles to enhance its benefits [8] and provide a shade continuum. For temperate and warm regions with defined seasons, large deciduous trees are recommended as they intercept solar radiation in summer but allow it to pass through in winter, which should be considered in the design of urban tree alignments. However, studies show that they can also slightly raise the nighttime temperature of urban canyons due to the capture of outgoing longwave radiation [9]. For shading purposes, trees should be located preferably along the sidewalk on the side of the pavement and at a distance that allows their crowns to generate a continuous canopy [8,10,11]. Trees reduce heat storage from exposed surfaces reducing long wave radiation emission which directly affects people. People's heat perception depends more on both insolation and the temperature of surrounding objects (mean radiant temperature) than on air temperature itself [7,11,12].

1.2. Human thermal comfort

Human thermal comfort is a condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment, assessed subjectively. Physiological and psychological variations among individuals make it difficult to find an environment that satisfies them all. Air temperature, radiant temperature, wind speed, and relative humidity are primary environmental factors that characterize the thermal environment and influence people's thermal sensation. Other factors like metabolic rate and clothing are considered physiological. Thermal comfort indices such as Physiological Equivalent Temperature (PET) can be determined from the physical parameters. The air temperature that receives the greatest acceptance of comfort usually lies between 20.0 °C and 25.8 °C depending on the type of climate evaluated [13–17]. Comfort level is related to thermal sensation, since a person who feels neither cold nor hot, would be thermally comfortable. Thermal sensation is a conscious perception, usually scored into categories such as: cold, cool, slightly cool, neutral, slightly warm, warm, and hot. Although the microclimatic and physiological parameters have a great influence on this perception, they only account for approximately 50 % of the variation found among objective and subjective comfort assessments. Variables related to psychological adaptation would explain the remaining variation, such as naturalness, expectations, experiences, exposure time, perceived control, and other environmental stimuli.

Existing comfort models are not fully developed to consider the effects of both environment- and human-based parameters for the assessment of outdoor thermal comfort performance [18]. Both are complementary and should be considered together in order to increase the use of outdoor spaces to reinforce social interaction [13,16,19,20].

Microclimatic parameters are commonly used to infer people's outdoor thermal comfort in open spaces. Studies that directly inquire about user's thermal perceptions and preferences in a subjective way are generally focused on public spaces with specific characteristics and purposes such as squares and parks, which are mainly used for recreational purposes. City center sidewalks are mostly functional sites to allow pedestrian traffic, where the possibilities of choosing different micro-environments to achieve thermal comfort are limited.

The specific aim of this study was to quantify and analyze the importance of street tree alignments on thermal benefit, focusing on downtown streets during the summer season. Our hypothesis was that the shade of street trees reduced the microenvironmental temperature and improved people's thermal comfort. We compared street sections with and without trees measuring physical parameters and performing thermal comfort interviews on people. In addition, to discriminate which variables best explained people's responses, we developed a multivariate analysis of the decision tree with physical data and human-based parameters.

2. Materials and methods

2.1. Climate representativeness

Montevideo, the capital city of Uruguay (−34.9055564, −56.1914125), contains 40 % of the country's population, with a density of 70 inhabitants/ha [21]. Its climate is characterized as temperate-subtropical, rainfall seasonal cycle is quite flat and there is no dry season (Cfa category of Köppen classification) [22]. The highest temperatures (maximum and mean) are in the summer months, from December to March. In the warmest month the mean temperature is above 22 °C and the mean maximum is 28 °C [23].

To verify that the study summer is within the ranges indicated by the climatology and therefore that the experiment took place under representative conditions, comparisons were made of the meteorological records of the study period with the climatological averages.

The meteorological records for the period December 2018–March 2019 were compared with the climatological averages (1981–2019) of the nearest meteorological station (Carrasco: −34.8328–56.0126) [23]. The monthly average of temperatures, wind and relative humidity, and the records for the days of the surveys (12/21/2018, 01/21/2019, 02/18/2019 and 03/28/2019) were compared.

2.2. Sites and sampling moment

“London plane” (*Platanus x acerifolia*) is a tree species used in many cities around the world, as it is a fast-growing tree and tolerant to air pollution and soil compaction. This deciduous tree can reach heights between 15 and 25 m and it is one of the species that

provides the greatest microclimatic benefits on the streets in relation to air temperature, relative humidity, solar radiation, radiant temperature and wind speed. However, its young shoots and fruits shed small hairs that can cause allergies [24–26]. This species represents 48 % of the tree population in the downtown area of Montevideo, Uruguay [27]. More than 86 % of the specimens in the city have diameters greater than 40 cm. This tree-size is considered functional in relation to the benefits they provide and has been shown to adapt correctly, with a good performance in relation to other species [27,28].

Three city streets of Montevideo were selected as repetitions. Within each street a section with trees and a section without trees were identified as sampling sites (Fig. 1). The streets are in the city center (downtown) municipality, which has the second highest population density, with 128 inhabitants per hectare and one tree lined in streets for every 9 people [27]. The measurements were made in the summer season from December 2018 to March 2019.

The south sidewalks were used for measurements. Although the buildings profiles were between 9 and 30 m high in these streets, the buildings around the measurement sites did not exceed the height of the trees so they did not produce any shadow on the sidewalk during the study window (11 a.m.–4 p.m.). The pavement width varied between 9 and 11 m and the sidewalks between 3 and 4 m. The pavement of the streets was asphalt and the sidewalk made of concrete tiles. The aligned trees were contemporary, adult and developed specimens of London Plane (*Platanus x acerifolia*). Trunk diameters ranged from 43 to 97 cm and their height was between 11 and 20 m, with good general sanitary condition. Trees were on the sidewalk, between the pedestrian pace and the pavement at an average distance of 17 m and the alignments generated a continuous canopy.

2.3. Thermal environment measurements

Six traditional Vernon globes [29,30] were used, one in each sampling site, three in tree-lined sections and three in unshaded sections on the north facing facades of the south sidewalk. The sensors inside the globes (TagTemp-S NFC portable data logger) were programmed to record the temperature (Globe T) every hour during the study period (Fig. 2). Instantaneous measurement of surface temperature (Façade T, Sidewalk T, Street T), air temperature (Air T) and wind speed (Wind S) were recorded with an infrared thermometer and a thermo-anemometer (Fig. 2) after carrying out the pedestrian interview in the places where the globes were located.



Fig. 1. Sampling sites in Montevideo city. Images show tree-lined sidewalks (shaded) and without trees (unshaded) sections (Google Earth Pro, 2018).

Vernon Globe	handmade in a workshop	
Material	hollow copper sphere, externally painted matte black	
Dimensions	15 cm in diameter	
Thermometer (inside)	TagTemp-S NFC portable data logger	
Brand	Novus	
Model	TagTemp-S	
Temperature measuring range	-30.0 °C to +60.0 °C	
Temperature measurement accuracy	±1 °C	

Infrared thermometer	Dual Laser InfraRed Thermometer	
Brand	Extech	
Model	42512	
Temperature measuring range	-50°C to 1000°C	
Temperature measuring accuracy	±0.5% or 1.8 °F/1 °C	

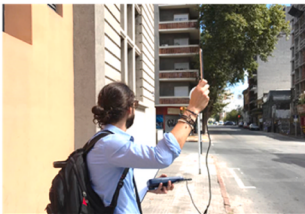
Thermo-anemometer	Heavy Duty Hot Wire CFM Thermo-Anemometer	
Brand	Extech	
Model	407119	
Temperature measuring range	-0 to 50°C	
Temperature measurement accuracy	±0.8°C°	
Wind speed measuring range	0.2 to 17.0m/s	
Wind speed measuring accuracy	± (5% + 5 digits)	

Fig. 2. Device technical features.

2.4. Experimental design and statistical analysis of the physical environment

A complete block design with 3 blocks was used. Each block (street) has sections shaded by trees (treatment) and the sections of reference without shadow.

It was assumed that there was no block by treatment interaction, since the species and the management received were the same, and also the construction profile and the orientation were similar. For processing and analyzing the temperature data obtained from the spheres, an autoregressive moving average model (ARIMA) [31] was used, considering the seasonal component ARIMA (2, 0, 0) (2, 0, 0)24 (appendix 7.1).

2.5. Structured interviews

Pedestrians standing (n = 95) or walking (n = 25) on the sidewalk of the three selected streets were surveyed. The total number of people interviewed in the period was 120, whose ages varied between 13 and 73 years; 57 were men and 63 women. Regarding clothing, 15 people were wearing a vest top, 74 a t-shirt, 24 a shirt, 4 a sweater and 4 a jacket; 31 were wearing short pants or a skirt and 89 were wearing long pants. The structured interviews took place during the hours of maximum temperatures (11 a.m.–4 p.m.), monthly, on clear days and with calm wind, during summer (Dec. 21, 2018, Jan. 21, Feb. 18 and March 28, 2019). Information was collected through a standardized questionnaire (appendix 7.2) and the sampling form was subjective by reasoned decision. In this type of sampling, the sample units are chosen according to some of their characteristics, such as the fact that they are walking on a shaded sidewalk. It is used when the size of the sample is very limited, and random oscillations that excessively distance the sample from the

characteristics of the population want to be avoided [32]. Adults walking or standing in the selected sites at the time of sampling were interviewed without selection by any other perceived characteristic. During each selected day, five people were surveyed per site, as this was the maximum number that could be done with the interviewer available during the stipulated time, so that all interviews were done on the same day and under similar conditions.

The thermal comfort questionnaire consisted of standardized questions and answers, and it used the categories proposed in ASHRAE (2013) [13] and included aspects raised by Thorsson et al. (2007) [33], [34]. Basic sociodemographic properties and specific aspects of the individuals were surveyed in the first place: gender, age, weight, and clothing. Second, interviewees were asked about their behavior: the activity they were doing at the time the survey was started and during the previous 15 min. Finally, interviewees were asked about attitudes in relation to their thermal perception. The current thermal sensation of the individual was enquired according to a 7-degree scale: *very cold*, *cold*, *slightly cold*, *neutral*, *slightly hot*, *hot*, *very hot*. Thermal preferences at that time were also recorded according to a 7-degree scale: *much colder*, *colder*, *slightly colder*, *no changes*, *slightly hot*, *hotter*, *much hotter*, and finally, comfort degree on a 3-level scale: *comfortable*, *acceptable*, *discomfort* [13,33] (appendix 7.2).

The effect of the treatments on the frequency of comfortable-uncomfortable cases was studied using a contingency table and the Irwin Fisher exact test. This test is valid for a low number of observations.

2.6. Physical and survey data crossing

To visualize the relationship between physical data and individuals' perceptions, the Partition platform of the JMP program was used [35]. This methodology finds groups of clusters for X values that best predict Y values. Thus, successive partitions are made, forming decision tree rules, until the desired fit is reached. The splitting criterion was "maximize significance", which means that the splits arise from the calculation of a significance value for each split; this significance value is presented as "LogWorth" and is the negative log of the adjusted *p*-value ($\text{LogWorth} = -\log_{10}(\text{p-value})$). All the measured variables were considered to generate a decision tree with those variables that best explain people's responses.

3. Results

3.1. Climate representativeness

From the point of view of climate representativeness, the studied period was representative of the time of year, taking as a reference the climate averages of the nearby Carrasco meteorological station (Table 1). This result allows us to generalize the experiment that was developed in only one summer, despite the interannual climate variability reported for Uruguay [36,37].

Table 1

Comparison of meteorological records (monthly mean) from December 2018 to March 2019 with climatological averages (1981–2019) and with the survey days (December 2018, January 21, 2019, February 18, 2019 and March 28, 2019).

	December				January			
	1988–2019	2018	Diff. ^h	21st 2018	1988–2019	2019	Diff.	21st 2019
TMED (°C) ^a	21	21	−0.6	23	23	23	0.5	23
TXM (°C) ^b	26	25	−1.0	–	27	27	−0.2	–
TNM (°C) ^c	16	16	−0.2	–	18	19	1.2	–
TX (°C) ^d	40	32	−8.1	27	39	35	−4.2	29
TN (°C) ^e	7	8	1.2	19	10	12	2.9	16
HR (%) ^f	70	70	0.1	82	71	75	4.2	69
V (kn) ^g	9	9	−0.2	5	9	9	−0.3	7
	February				March			
	1988–2019	2019	Diff.	18th 2019	1988–2019	2019	Diff.	28th 2019
TMED (°C)	22	22	−0.4	25	21	20	−0.7	20
TXM (°C)	27	27	0.1	–	25	24	−1.3	–
TNM (°C)	18	17	−0.9	–	16	16	−0.1	–
TX (°C)	38	34	−3.4	30	35	33	−2.2	25
TN (°C)	8	11	2.6	19	7	10	2.9	14
HR (%)	73	69	−4.1	71	75	76	1.6	72
V (kn)	8	7	−1.1	8	8	7	−0.6	8

^a Mean air temperature.

^b Maximum air temperature mean.

^c Minimum air temperature mean.

^d Absolute maximum air temperature.

^e Absolute minimum air temperature.

^f Relative humidity mean.

^g Wind speed mean in 24 hs

^h Difference between the climatological averages 1961–1990 and the survey days.

Mean temperatures were 21 °C in December 2018, 23 °C in January, 22 °C in February and 20 °C in March 2019. Relative humidity and mean wind speed were also representative in relation to historical records. The maximum mean temperatures also were those expected for each month of the season. Mean maximum temperatures were above 24.5 °C, which is considered the lower air temperature above which people in general prefer to be in the shade [17].

3.2. Physical microenvironment

Globe temperature records showed significant differences in the physical environment between tree-shaded sections and unshaded ones. Globe temperatures were used as a reference parameter since it is one of the variables used to estimate the mean radiant temperature, which is one of the most affected by tree shade, where lower temperatures were actually recorded [7,38].

For December, February and March, the globes located in unshaded sections, registered a difference of up to 9 °C in relation to those located in the shade (Fig. 3 a, c and d). In January, the difference reached 8 °C (Fig. 3b). Globe temperatures recorded in the shaded sections were more stable and showed lower variability than in the unshaded sites, as shown with the predicted values of the seasonal ARIMA model in Fig. 3.

3.3. Interviews

3.3.1. Comfort level

The proportion of respondents who said that they were comfortable in the shaded sections was more than double that of the unshaded section. The frequency of respondents who said that they perceived an acceptable level of comfort was similar under both treatments. All respondents who reported being uncomfortable were in unshaded places (Fig. 4).

Irwin-Fisher test found statistical differences in “comfortable” and “uncomfortable” groups between treatments (sun/shade), considering error bars with a 95 % confidence (Fig. 4).

3.3.2. Comfort level and thermal sensation

Within the comfort and acceptable groups, the proportion of respondents in the neutral and slightly hot categories of thermal sensation increased greatly (Fig. 5a). Although heat discomfort was observed under both treatments, extreme heat categories had higher frequencies in unshaded places. All the subjects who reported being in discomfort responded that they were feeling some of the levels of “heat” at that time (Fig. 5a).

The frequency of answers reflecting neutrality doubled under shade (Fig. 5a). Within the “comfortable” category, both in shaded and unshaded sections, the proportion of subjects who said they were feeling some level of heat was lower within “comfort” under shade (Fig. 5 a).

3.3.3. Comfort level and thermal preferences

The proportion of respondents who said that they did not prefer any thermal change at that time increased in the shaded sections

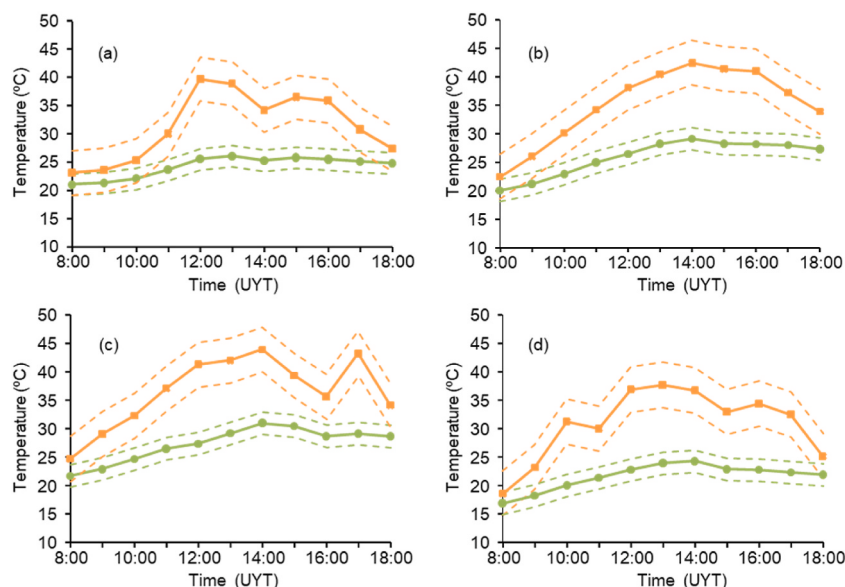


Fig. 3. Predicted values under sun (orange squares) and under tree shade (green dots) on the December 21, 2018 (a), January 21, 2019 (b), February 18, 2019 (c) and March 28, 2019 (d). Variation of the globe temperature into error bands (orange and green stripes) with a 95 % confidence interval.

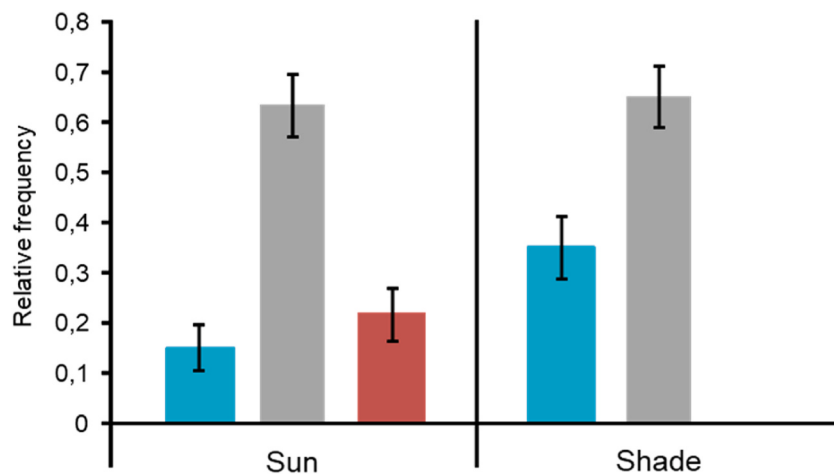


Fig. 4. Comfort level expressed by interviewees 'comfortable' (blue), 'acceptable' (gray), 'discomfortable' (red) (relative frequency) under treatments (sun/shade).

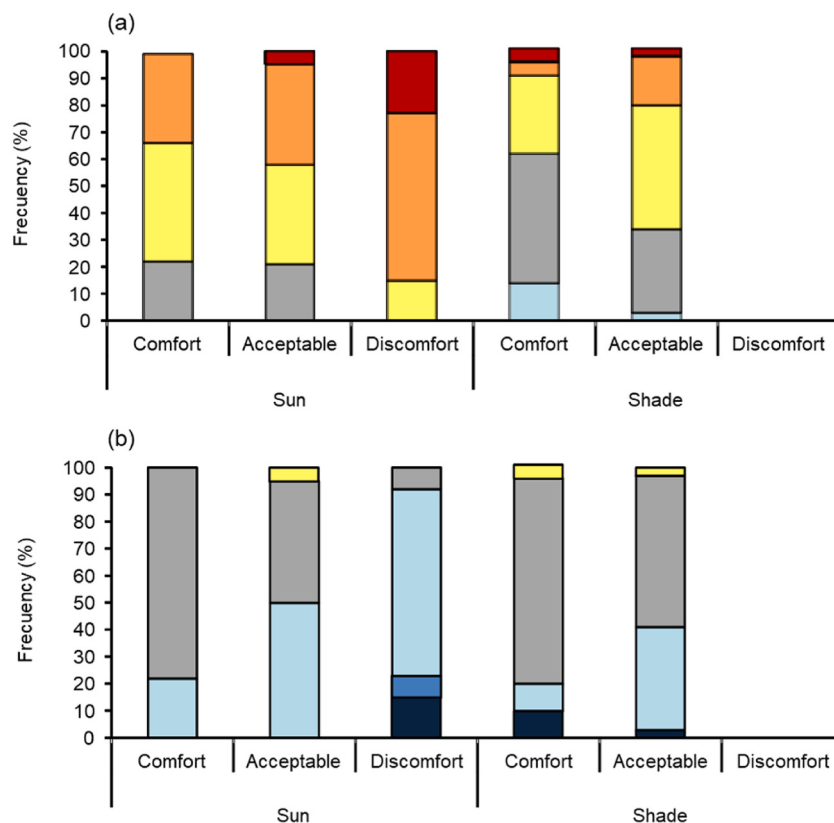


Fig. 5. Thermal sensation (a) and thermal preferences («rather be») (b) expressed by interviewees (percentage frequency) inside groups of comfort level, under treatments (sun/shade).

(Fig. 5b). More than 75 % of the individuals who said that they did not prefer any thermal change at that time were comfortable under both treatments (Fig. 5b). Both neutral and slightly hot responses were clearly associated with comfortable responses.

3.4. Association between comfort levels and thermal preferences with other variables

Individual personal variables (gender, age, weight, clothing, activity) and physical variables of the thermal environment (Globe T,

Air T, Façade T, Street T, Sidewalk T and Wind S) were analyzed together in a multivariate analysis in a decision tree (Fig. 6). The analyses identified only those variables that were significantly associated with the responses expressed by the interviewees. The first split was by façade temperature (Façade T), grouping all the discomfort answers inside the group with façade temperatures above 30 °C. Then, inside this group, sidewalk temperature (Sidewalk T) was the second variable that split the subgroup. On the other side of the decision tree, from the group with façade temperatures lower than 30 °C, the time of the day the interview was performed was the second variable to splitting that group (Time) followed by wind speed (Wind S).

When thermal preference was considered as a response variable, the first split was due to months, where responses for March were different from the rest of the dates. March mostly groups people who did not prefer any thermal change. For the other dates, the first split was due to treatment, that is, people under tree-shaded and unshaded sections. Here, shaded sections, grouped more people who did not prefer any change. Within the shaded group, we found slight differences between male and female interviewees (Fig. 7).

4. Discussion

4.1. Thermal discomfort and high temperatures

There was a clear correspondence between the physical parameters and the comfort level, and the thermal discomfort was clearly associated with high temperatures. The mean air temperature registered in the meteorological station for the days of the surveys was above 20 °C, which is the air temperature reference that in general receives the best acceptance in relation to the outdoor comfort level for cities with a temperate climate such as Manchester (UK), although with lower mean temperatures for the warm season than Montevideo [17]. For the town of Nogales in Mexico, with a mean temperature of 30 °C, a “neutral” comfort temperature was observed at 25.8 °C [16]. This kind of difference is why the latest review article on this topic expressed the necessity of location-based studies to address climate and social conditions in thermal comfort studies [18].

When comparing “comfortable” groups under both treatments, people who said they were feeling heat (any of the 3°) represented lower proportions in shaded sections. Thus, in general, the level of comfort of the interviewees increased under shade, which emphasizes the improvement in sidewalk thermal comfort consistently with the improvement in comfort indexes based on physical variables [14,39]. This implies that the improvement in physical variables is also directly detected by the users, who found the most beneficial spots under trees, because of this thermal over-stress reduction [39]. On the other hand, no discomfort responses were found at these sites, where the microenvironments were cooler.

4.2. Thermal sensation and individual preferences

In the structured interviews, questions related to the perception of the thermal environment are related to attitudes, which can lead to imprecise and ambiguous answers and cause respondents to give normative answers [32]. For this reason, we first asked about specific aspects to later contrast consistency with the general comfort level. Responses of thermal sensation showed that the effect of trees was even greater than that reflected only by comfort responses, because satisfactory thermal sensation categories can lead to “acceptable” as well as “comfortable” comfort responses. On the other hand, this can be used to confirm that those people who answered that they were comfortable effectively perceived it. In this study, answers were generally consistent, since the groups that said that they were comfortable were composed mostly by people who did not prefer any thermal change.

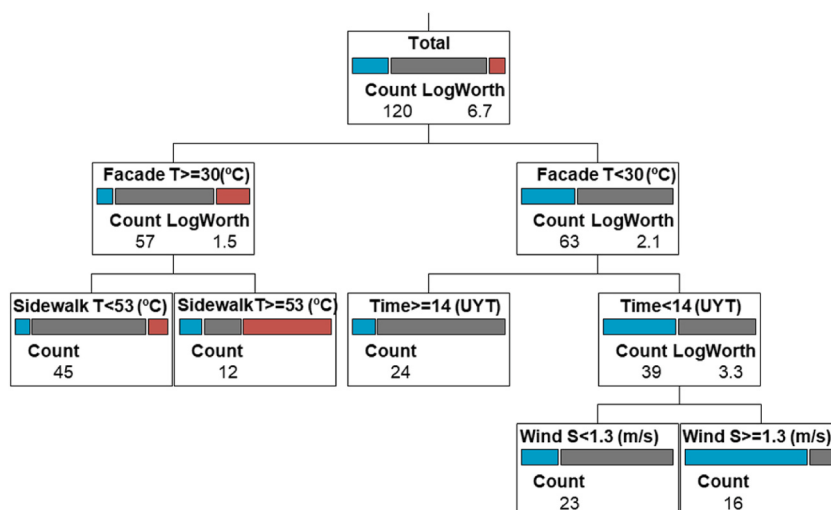


Fig. 6. Decision tree for comfort level expressed by interviewees: ‘comfortable’ (blue), ‘acceptable’ (gray), ‘uncomfortable’ (red), ($P < 0,05$, $\text{LogWorth} > 1,3$).

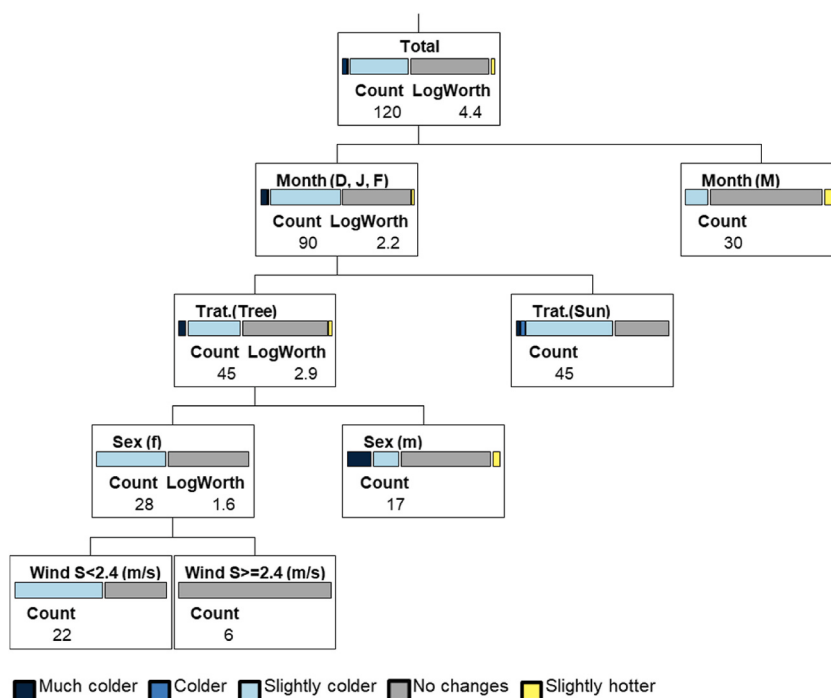


Fig. 7. Decision tree for thermal preferences («rather be») expressed by interviewees, ($P < 0,05$, $\text{LogWorth} > 1,3$).

Individuals who declared to be in discomfort and were feeling some heat level would indeed have preferred to be feeling cooler to some degree, which makes it clear that the discomfort is due to the heat, and they are not thermally comfortable. On the other hand, groups that said they were comfortable were, in fact, mostly made up of people who did not prefer any thermal change at that time, which shows that there is thermal satisfaction with the environment [13,16]. When comparing these groups under both treatments, the situation with the highest proportions of people who declared feeling effectively "neutral" were those who were in shaded sections.

The acceptable category could be masking other comfort levels due to the phenomenon of acquiescence: "... tendency of the interviewees to choose the answers that express agreement, to give affirmative answers rather than negative ..." [32]. This would explain those people who responded as "comfortable" or "acceptable" after having expressed a "hot" or "very hot" thermal sensation. Consequently, we may interpret that those individuals who actually said to be neutral or somewhat warm, but then said that they were "acceptable", were actually "comfortable". Taking this into consideration and analyzing thermal comfort, it can be said that the frequency of comfortable people doubled under shade, which supports the significant positive impact tree shade provides on pedestrian thermal comfort [39]. Sidewalk trees are often the subject of heated public debate due to their effect on the deterioration of sidewalks or the inconveniences that the fruiting of London planes generates. In some cases, such as the city of Montevideo, the debate reaches the point of suggesting their massive extraction without considering the positive effect on people's thermal comfort under natural shade.

4.3. Comfort responses in specific groups

Groups were split only by physical variables when comfort answers were taken as the response variable. The variables usually mentioned as the most important factors determining people's thermal comfort [13], were those that divided the comfort groups in first order. The successive divisions were based on physical environment variables, related to radiant temperature [16]. There were no associations with specific variables to the individuals. However, some aspects related to physiological and psychological adaptation become visible when analyzing the regression tree which takes "rather be" as the response variable. In this case, decisive factors involved other aspects in addition to the physical microclimatic parameters, such as month, treatment, or gender. Specifically within the individual variables, gender was a significant one in thermal preferences, with the 46,4 % of females under shade preferring a slightly colder environment, a 10 % up in relation to males (Fig. 7). Including all the variables surveyed (physical and "personal") allowed gender (sex) to be discriminated as a statistically significant variable. According to Aghamolaei et al. (2023) [18], differences in gender are one of the most important issues that should be taken into consideration in the assessment of thermal comfort in public spaces.

Different people perceive the environment in different ways and respond to stimuli depending on the information they have about the particular situation and not in direct relation to the magnitude of physical variables [20]. This involves expectations about how the thermal environment should be, rather than how it really is [20]. Because it is expected to be hot in the summer, many respondents found themselves not preferring any thermal change in the warmer months (December, January and February), despite the fact that the temperatures are considerably higher than what would be expected for an individual to feel comfortable. Thus, in those months,

people are predisposed to high temperatures and are inclined to tolerate them. But at the same time, another large group would prefer to feel colder, which makes it clear that they feel hot, and a cooler environment would allow them to reach a neutrality level, particularly in unshaded sections.

In January, which is normally warmer, the trend in the proportion of individuals who answered being "comfortable" under both treatments, changed. This leads us to think that in this month, people are predisposed to feeling hot and that although the amount of "acceptable" increases under shade, perhaps the effect of tree shade on the microenvironmental temperature is not sufficient to achieve thermal neutrality and therefore elicits a "comfortable" answer. In March, on the other hand, where temperatures are lower and closer to what is expected to reach comfort, most of the individuals would not have preferred any change, and therefore we can say that they found themselves comfortable. In this month, the proportion of comfortable people in the shade triples in relation to unshaded places, which shows the more effective contribution of tree shade with less extreme temperatures.

We agree with Aghamolaei et al. (2023) [18] that the study of the combined effects of physical and human-based variables on thermal comfort in open spaces is the main challenge for researchers. We believe that the combined evaluation of the physical and human-based parameters presented in this study, through the decision tree analysis, is a contribution in that sense.

4.4. Limitations of this research

In this research, results have been obtained from widely used measurement instruments, standard surveys and rigorous statistical analyses, all of which are supported by the bibliography. However, we believe that it would be beneficial to complement the research by repeating the experiment in other years and surveying a larger number of people.

5. Conclusions

This study revealed a greater impact of physical variables than personal variables on people's thermal comfort and thermal preferences in the summer in a temperate climate. However, the gender variable resulted in a statistically significant one in thermal preferences, where females would prefer feeling cooler even under shade, a 10 % up in relation to males. Finding this result was possible by using the statistical decision tree methodology that combines all the variables in the same analysis, unlike studies that analyze the personal variables separately. At the same time, the results are supported by field work (in situ experimentation) rather than model simulations.

Our experiment showed that a great number of people surveyed under both treatments stated they did not feel fully comfortable due to summer season heat, which shows that microenvironmental temperatures recorded in the analyzed streets are above those considered thermally neutral by people. Tree shade refreshes locally, reducing the microenvironmental radiant temperature and improving people's comfort level. It also generally improves their thermal conditions of "neutrality" and eliminates the extreme "discomfort" heat sensation. The positive effect of shade on thermal comfort is still present under less extreme conditions, which means that this benefit can extend at least over the 4 months studied.

Variables that involve aspects of the global context also arise when considering preferences, including expectations in relation to the month and preferences for wooded sites. In this way, the predisposition to experience high temperatures can mask part of the direct physical effect of shade, since the sensation of heat (objective and subjective) would be at a higher level in relation to the cooling effect.

This study focused on how street trees can influence pedestrian thermal comfort, unlike the thermal comfort studies that are carried out in squares or parks. Our intention was to elucidate the effect of tree shade in places where people pass daily, not necessarily where people stay for recreational or relaxing purposes. In this sense, tree alignments constitute a powerful tool for improving the thermal microenvironment in the streets of temperate cities; therefore, they are also a tool to adapt to climate change. This is not only due to their influence on physical parameters, but also due to the improvement in perceived thermal comfort on the sidewalks, where the effect of the heat of summer is a discomfort factor. These results could help local governments to justify that urban tree alignments bring a lot more than just ornament to the cities. Trees are needed to improve people's quality of life in urban areas.

Data availability statement

Data will be made available on request.

CRediT authorship contribution statement

Emilio Terrani: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Alicia Picción:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Supervision, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization. **Oscar Bentancur:** Writing – review & editing, Supervision, Software, Methodology, Formal analysis. **Gabriela Cruz:** Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Resources, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work was carried out with the aid of a grant from the Uruguayan National Agency for Research and Innovation (ANII) and the support of the Scientific Research Commission (CSIC) from Universidad de la República, Uruguay.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32762>.

References

- [1] UN-Habitat, Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas, Earthscan, Río de Janeiro, 2011 [Online]. Available: <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/LasCiudadesYElCambioClimáticoOrientacionesParaPolíticas.pdf>.
- [2] M. Hulme, et al., Climate change scenarios for the United Kingdom: the UKCIP02 scientific report. Tyndall centre for climate change research, UKCIP02 Sci. Rep. (April) (2002) 120 [Online]. Available: http://www.ukcip.org.uk/wordpress/wp-content/PDFs/UKCIP02_tech.pdf.
- [3] A. Matzarakis, B. Amelung, Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans, Adv. Glob. Chang. Res. 30 (2008) 161–172, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6877-5_10.
- [4] IPCC, Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación Y Vulnerabilidad. Resúmenes, Preguntas Frecuentes Y Recuadros Multicapítulos, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, 2014. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es.pdf.
- [5] S.E. Gill, J.F. Handley, A.R. Ennos, S. Pauleit, "Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure LK, Built Environ. TA - TT 33 (1) (2007) 115–132. <https://slc.on.worldcat.org/oclc/123729317>.
- [6] G.M. Heisler, Energy savings with trees, J. Arboriculture. 12 (5) (1986) 113–125, 12 113–125.
- [7] D. Armson, P. Stringer, A.R. Ennos, The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area, Urban For. Urban Green. 11 (3) (2012) 245–255, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>.
- [8] Z. Li, H. Zhang, Y.-H. Juan, Y.-T. Lee, C.-Y. Wen, A.-S. Yang, Effects of urban tree planting on thermal comfort and air quality in the street canyon in a subtropical climate, Sustain. Cities Soc. 91 (2023) 104334.
- [9] C. Wang, Z.H. Wang, Y.H. Ryu, A single-layer urban canopy model with transmissive radiation exchange between trees and street canyons, Build. Environ. 191 (December 2020) (2021) 107593, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107593>.
- [10] S. Strom, Urban and community forestry: planning and design, Urban Community For. Northeast (2007) 99–117, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8_6.
- [11] L.V. de Abreu-Harbach, L.C. Labaki, A. Matzarakis, Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics, Landsc. Urban Plan. 138 (2015) 99–109, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>.
- [12] J. Monteith, M. Unsworth, Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere, fourth ed., Academic Press, 2013 <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66393-0>.
- [13] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy." [Online]. Available: https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_55-2013.
- [14] R. Sanusi, D. Johnstone, P. May, S.J. Livesley, Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index, Landsc. Urban Plan. 157 (Jan. 2017) 502–511, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>.
- [15] H. Mayer, P. Höpfe, Thermal comfort of man in different urban environments, Theor. Appl. Climatol. 38 (1) (1987) 43–49, <https://doi.org/10.1007/BF00866252>.
- [16] F. Guzmán, J. Ochoa, Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos, Clima cálido y frío semi-seco, Hábitat Sustentable 4 (2) (2014) 52–63.
- [17] E. Wilson, F. Nicol, L. Nanayakkara, A. Ueberjahn-Tritta, Public urban open space and human thermal comfort: the implications of alternative climate change and socio-economic scenarios, J. Environ. Policy Plan. 10 (1) (2008) 31–45, <https://doi.org/10.1080/15239080701652615>.
- [18] R. Aghamolaei, M.M. Azizi, B. Aminzadeh, J. O'Donnell, A comprehensive review of outdoor thermal comfort in urban areas: effective parameters and approaches, Energy Environ. 34 (6) (2023) 2204–2227.
- [19] S. Thorsson, M. Lindqvist, S. Lindqvist, Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden, Int. J. Biometeorol. 48 (3) (2004) 149–156, <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0189-8>.
- [20] M. Nikolopoulou, K. Steemers, Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, Energy Build. 35 (1) (2003) 95–101, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1).
- [21] Instituto Nacional de Estadística del Uruguay (INE), Anuario Estadístico Nacional 2022, 2022. Montevideo, <https://www5.ine.gub.uy/documents/SEN/AnuarioEstadísticoNacional/AnuarioEstadísticoNacional2022.pdf>.
- [22] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci. 11 (5) (2007) 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [23] INUMET, "Estadísticas climatológicas." Accessed: May 28, 2017. [Online]. Available: <http://www.meteorologia.com.uy/ServCli/tablasEstadisticas>.
- [24] J.J. Valla, A. Saenz, S.M. Rivera, L.S. Jankowski, D. Bazzano, Árboles Urbanos 2, Biota Rioplat, VI, LOLA, Buenos Aires, 2001.
- [25] A. Grau, A. Kortsarz, Las especies de árboles de Tucumán, in: Artes Gráf, A. Levy, Salta AR (Eds.), Guía de arbolado de Tucumán, 2012, pp. 109–229.
- [26] R. Sanusi, D. Johnstone, P. May, S.J. Livesley, Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index, Landsc. Urban Plan. 157 (Jan. 2017) 502–511, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>.
- [27] E. Terrani, Evaluación de la estructura y comportamiento del arbolado urbano de Montevideo, Facultad de Agronomía, 2014.
- [28] N.A. Richards, Diversity and stability in a street tree population, Urban Ecol. 7 (2) (1983) 159–171, [https://doi.org/10.1016/0304-4009\(83\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0304-4009(83)90034-7).
- [29] S. Thorsson, F. Lindberg, I. Eliasson, B. Holmer, Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting, Int. J. Climatol. 27 (14) (Nov. 2007) 1983–1993, <https://doi.org/10.1002/joc.1537>.
- [30] N. Kántor, J. Unger, The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment - the mean radiant temperature, Cent. Eur. J. Geosci. 3 (1) (2011) 90–100, <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>.
- [31] D.S. Wilks, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, second ed., vol 91, 2007.
- [32] P. Corbetta, Metodología y Técnicas de Investigación Social, McGraw-Hill, Madrid, 2007.
- [33] S. Thorsson, T. Honjo, F. Lindberg, I. Eliasson, E.M. Lim, Thermal comfort and outdoor activity in Japanese urban public places, Environ. Behav. 39 (5) (2007) 660–684, <https://doi.org/10.1177/0013916506294937>.
- [34] I. Eliasson, I. Knez, U. Westerberg, S. Thorsson, F. Lindberg, Climate and behaviour in a Nordic city, Landsc. Urban Plan. 82 (1–2) (2007) 72–84, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.01.020>.
- [35] D. Salvatore and D. Reagle, Statistics and.
- [36] M. Renom, M. Rusticucci, Evidence for interannual and interdecadal extreme temperature variability in Uruguay, in: Int. Conf. South, 2006, pp. 1585–1594, 2005, http://bibdigital.sid.inpe.br/rep-cptec.inpe.br/adm_conf/2005/10.27.17.14.

- [37] M. Rusticucci, M. Renom, Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay, *Int. J. Climatol. A J. R. Meteorol. Soc.* 28 (8) (2008) 1083–1095.
- [38] Ashrae Standard, ASHRAE handbook 2001 fundamentals, Ashrae Stand 53 (9) (2001) 1689–1699, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [39] S. Parison, et al., The effects of greening a parking lot as a heat mitigation strategy on outdoor thermal stress using fixed and mobile measurements: case-study project 'tertiary forest, *Sustain. Cities Soc.* 98 (July) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104818>.