

Evaluación del confort bioclimático del verde urbano árido mediante simulaciones micrometeorológicas y el índice UTCI

Evaluation of the bioclimatic comfort of the arid urban green through micrometeorological simulations and the UTCI index

Alejandra Kurbán (*), Santiago Tosetti (**), Mario Cúnsulo (***), Eduardo Montilla (****), Andrés Ortega (****)

RESUMEN

En el marco de estudios de confort térmico en espacios públicos de ambientes áridos urbanos, se calcula el índice UTCI en una muestra de espacios verdes (EVU) y canales viales (CVU), en escenario actual y mejorado, como validación de indicadores bioclimáticos obtenidos previamente por los autores. Se utiliza ENVI-met para simular micrometeorológicamente las muestras y obtener las variables de cálculo del UTCI. Para los CVU, en los escenarios mejorados, se logran disminuciones de UTCI entre los 0,3°C y los 9,3°C. Se observa que, a mayor relación de H/W, se incrementa el valor de UTCI y que ante mayor valor de la Isla de Calor, crece la importancia del arbolado. Para los EVU, la diferencia de UTCI en menos es entre 0,4°C a 3,0°C. Se concluye que, observando indicadores bioclimáticos específicos de zonas áridas, pueden adoptarse acciones para mejorar las condiciones de confort bioclimático de la población.

Palabras clave: índice UTCI; simulación microclimática ENVI-met; indicadores bioclimáticos de verde urbano árido; clima urbano.

ABSTRACT

Within the framework of thermal comfort studies in public spaces in arid urban environments, the UTCI index is calculated in a sample of green spaces (EVU) and road canals (CVU), in the current and improved scenario, as a validation of bioclimatic indicators obtained by the Executing Unit (INEAA). ENVI-met is used to micrometeorologically simulate the samples and obtain the calculation variables of the UTCI. In the case of UVCs, UTCI decrements of between 0.3°C and 9.3°C are generated. It is observed that, with a higher H/W ratio, the UTCI value increases and that with a higher value of the Heat Island, the importance of the alignment trees increases as well. For EVUs, the UTCI difference in minus is between 0.4°C to 3.0°C. It is concluded that, by applying specific bioclimatic indicators of arid zones, the bioclimatic comfort conditions of the population improve.

Keywords: UTCI index; ENVI-met microclimatic simulation; bioclimatic indicators of arid urban green; urban climate.

(*) Doctora en Arquitectura y Urbanismo. Profesora UNSJ. Profesional Principal CONICET, San Juan (Argentina).

(**) Doctor en Ingeniería. Investigador Adjunto CONICET. Profesor UNSJ, San Juan (Argentina).

(***) Ingeniero. Profesor UNSJ. Profesional Principal CONICET, San Juan (Argentina).

(****) Arquitecto. Profesor UNSJ, San Juan (Argentina).

Persona de contacto: akurban@unsj.edu.ar (A. Kurbán)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8795-1129> (A. Kurbán); <https://orcid.org/0000-0001-9255-5422> (S. Tosetti); <https://orcid.org/0000-0001-7981-6683> (M. Cúnsulo); <https://orcid.org/0000-0001-7814-5734> (E. Montilla); <https://orcid.org/0000-0002-8077-860X> (A. Ortega)

Cómo citar este artículo/Citation: Alejandra Kurbán, Santiago Tosetti, Mario Cúnsulo, Eduardo Montilla, Andrés Ortega (2023). Evaluación del confort bioclimático del verde urbano árido mediante simulaciones micrometeorológicas y el índice UTCI. *Informes de la Construcción*, 75(571): e504. <https://doi.org/10.3989/ic.6262>

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 03/08/2022
Aceptado/Accepted: 20/04/2023
Publicado on-line/Published on-line: 16/08/2023

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de San Juan, ubicada al centro oeste de la República Argentina, se localiza en su totalidad, en la diagonal árida sudamericana y según el Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe (1), en ella se encuentra la única Región Xérica de ese país que cubre solo el 1% del territorio nacional. San Juan posee uno de los climas más rigurosos de las zonas áridas sudamericanas: ocupa el primer lugar por su índice de continentalidad (40,5), temperaturas promedio máximas anuales (26,2°C) y mínimas anuales (10,2°C); el segundo lugar por los porcentajes de heliofanía relativa (71,8%) y el tercer lugar por sus índices hídricos y de aridez (-53,8 y 0,102, respectivamente); por la precipitación anual (96 mm) y por la radiación solar (anual: 456,3 cal/cm²·día⁻¹), (2). En función de lo anterior, puede caracterizarse el clima de San Juan como: árido continental mesotermal con elevadas oscilaciones diurnas y anuales de temperatura; fuerte radiación solar en verano y nubosidad moderada distribuida uniformemente a lo largo del año. Veranos calurosos, con aire relativamente deshidratado e invierno frío con aire más húmedo. Régimen estival de precipitaciones. Viento prevalente del sector sur con ráfagas intensas asociadas con tempestades de polvo luego del viento local Zonda (tipo Föhn), proveniente del sector oeste.

En la diagonal árida sudamericana, que cubre el 69% del territorio argentino, existe un importante potencial climático, que convenientemente aprovechado, puede proveer confort higrotérmico a la población, mejorando la calidad del hábitat en el espacio urbano público y consecuentemente en los interiores edilicios, disminuyendo al mismo tiempo, la dependencia de energías convencionales para el acondicionamiento climático de los mismos.

Las urbanizaciones imponen un grado de artificialización al ambiente, produciendo entre otras consecuencias, modificaciones al clima macroescalar, tanto mayor cuanto más riguroso sea dicho clima y mayor sea la densidad volumétrica de la trama urbana y sus formas de ocupación del espacio. Esta modificación del clima regional o macroescalar como consecuencia de la implantación de un asentamiento humano constituye el clima urbano y su conocimiento científico es el punto de partida, para ser incorporado al diseño bioclimático como dato real del clima específico de la ciudad, con el fin de obtener condiciones de confort higrotérmico para la población.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y ESTADO DEL ARTE

Los principales aspectos de la climatología urbana, por su directa incidencia en la calidad de vida de sus habitantes, particularmente aquellas localizadas en zonas áridas (3), los constituyen los fenómenos microclimáticos de Isla de Calor. La Isla de Calor ha sido definida como el calentamiento relativo de la ciudad comparado con las condiciones pre-urbanas (4), o como las diferencias entre la temperatura urbana y la no urbana (5). También se la ha conceptualizado como diferencia de temperatura entre dos zonas climáticas diferentes (LCZ), caracterizadas cada una por presentar uniformidad en su cobertura de suelo, estructura urbana y actividades humanas (6). Garland (7) la define como un oasis invertido, donde las temperaturas del

aire y de las superficies son más cálidas que aquellas en sus entornos rurales.

Si se diseñaran bioclimáticamente los elementos que configuran el tejido de los espacios abiertos públicos procurando disminuir los efectos negativos de la Isla de Calor, esto redundará positivamente en dos aspectos: por un lado, la población contará con mejores condiciones para desarrollar actividades al aire libre (sean éstas circulatorias o de recreación) y por otro lado, esta reducción de la rigurosidad microclimática resultará a su vez en la disminución de la carga térmica a la que están sometidos los edificios.

Esas estrategias bioclimáticas conforman una amplia gama de decisiones, entre las que se destaca el manejo del Verde Urbano, cuya aplicación es altamente eficaz en el mejoramiento de las condiciones higrotérmicas de los entornos urbanos (8 - 13). Es decir, utilizando un elemento urbano como es la forestación, tanto del arbolado de alineación como de los espacios verdes, pueden refrigerarse pasivamente los espacios abiertos públicos en verano y procurarse el mayor acceso al sol en invierno, con la consiguiente reducción de la carga climática edilicia.

La aplicación de índices de confort para espacios exteriores, constituye una herramienta imprescindible para cuantificar el efecto de las características de la urbanización y la forestación en la percepción térmica de las personas. Para seleccionar el índice de confort a aplicar, se verificó que el mismo reuniera las siguientes condiciones: i) Representar los factores propios de los espacios abiertos y forestados; ii) Permitir la comparación de sus resultados a nivel internacional; iii) Ser valores numéricos; Incorporar evaluaciones fisiológicas del cuerpo humano; y iv) Resultar del cálculo de los valores registrados con sensores in situ.

En función de las condiciones anteriores, se seleccionó el índice UTCI: Universal Thermal Climatic Index, basado en la valoración de la respuesta fisiológica (14 - 17). Este índice se originó en la revisión encomendada por la International Society for Biometeorology, con el objetivo de integrar la diversidad de índices existentes. El UTCI se desarrolló como parte del Programa de acción europeo COST y se anunció por primera vez a la comunidad científica en 2009. Un requisito fundamental fue que siempre tuviera el mismo significado termofisiológico, con independencia de la combinación de los valores intervinientes. Ha sido sometido en el último decenio a estudios en diferentes países con resultados consistentes con las distintas situaciones de estudio. Se destaca el libro *Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology* (18 - 19) con hallazgos que confirman la importancia del UTCI como un índice bioclimático, de interés para los investigadores en las áreas interdisciplinarias de biometeorología, climatología y planificación urbana.

Actualmente, la ciudad de Londres aplica el UTCI en su "Thermal Comfort Guidelines for developments in the city of London" (20). Estas Directrices han introducido una nueva técnica en la planificación urbana a fin de comprender las cualidades microclimáticas de los espacios públicos de la ciudad, como también una metodología para evaluar el impacto de nuevos desarrollos en el microclima de las calles, parques, azoteas, terrazas públicas y otros espacios públicos.

Por otra parte, los programas de simulación micrometeorológica permiten su uso como instrumento de planificación urbana sustentable (20 - 28).

Como herramienta para la evaluación del impacto de las estrategias de mejoramiento propuestas, se utilizó el software ENVI-met 5.03 (29) en su versión Lite, por poseer capacidades y ventajas como instrumento de planificación urbana sustentable, ya que el alto grado de ajuste de la temperatura del aire de las curvas diarias medidas, en comparación con las curvas simuladas, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos, en relación con el comportamiento térmico urbano tanto para el día como durante la noche (30 - 39).

3. METODOLOGÍA

El estudio del confort bioclimático en cada muestra urbana (calles forestadas y espacios verdes), se realizó al mediodía solar y en dos escenarios:

- Escenario 1: por simulación micrometeorológica a partir de datos climáticos del mismo día y hora en el que se realizaron las mediciones, provenientes de estaciones meteorológicas de control, que no superaran los 4.000m de distancia de la zona estudiada y con similares condiciones urbanísticas.
- Escenario 2: simulación micrometeorológica a partir de datos climáticos del Escenario 1, pero modificando la situación arbórea actual, en función de los Indicadores Bioclimáticos de Verde Urbano para zonas áridas propuestos por Kurbán, A. et al (8) y Kurbán, A. (10).

Como referencia de la situación del clima urbano del AMSJ, se adoptaron los valores de la Isla de Calor Urbana y Depresión Térmica del verano, ya que constituye la estación en la que se potencia el desconfort higrotérmico del clima macroescalar. Los trabajos realizados en el AMSJ por Papparelli et al. (40), a partir del año 1995 y en forma quinquenal, identifican tres parámetros para ambos fenómenos microclimáticos: i) Intensidad: valor máximo absoluto de diferencia de temperatura de bulbo seco, obtenido entre un punto cualquiera de la ciudad, en relación con el centro urbano principal; ii) Alcance: distancia máxima medida sobre cada orientación cardinal, desde el centro principal de la ciudad, hasta la isolínea de $\Delta T^{\circ}\text{C} = 0,0^{\circ}$ y $\Delta \text{HR}\% = 0,0\%$; y iii) Extensión: porcentaje de variación entre la distancia del límite urbano al centro principal y la distancia del alcance máximo de la Isla de Calor, medida sobre el eje de cada orientación cardinal. Calculada para el verano del año 2020, la Intensidad máxima de la Isla de Calor Urbana del AMSJ fue de 5°C ; su Alcance, de 7.444m; y su Extensión, de 8,1%. A su vez la Depresión Humídica tuvo una Intensidad máxima de 4%; su Alcance, de 7.409m; y su Extensión, de 7,6%. (41).

4. CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIÓN

4.1. Determinación del muestreo urbano: canales viales urbanos y espacios verdes públicos

La determinación de áreas muestra urbanas, para las cuales se calculó el índice bioclimático UTCI y se realizaron simulaciones del microclima, se realizó en función de las características de la distribución espacial de la edificación

en el AMSJ. Estudios quinquenales realizados previamente por los autores desde el año 1993 en adelante, demostraron la presencia de Bandas Urbanas Características (BUC), definidas como áreas homogéneas y continuas del ejido urbano, con índices urbanísticos de similar valor, comprendida entre dos isolíneas representativas del Factor de Ocupación del Suelo (FOS), las que identifican su límite territorial y el estado de situación espacial. El estudio correspondiente al año 2020 (41), definió las BUC, cuya espacialización está limitada por valores de Factor de Ocupación del Suelo, Densidad Volumétrica edilicia y Canopia Urbana:

- BANDA EMINENTEMENTE URBANA: $\text{FOS} > 40\%$; $\text{DV} > 14.000\text{m}^3/\text{Ha}$; $\text{CU} > 3,7\text{m}$;
- BANDA URBANA: $20\% < \text{FOS} < 40\%$; $6.000\text{m}^3/\text{Ha} < \text{DV} < 14.000\text{m}^3/\text{Ha}$; $3,30\text{m} < \text{CU} < 3,70\text{m}$;
- BANDA SUBURBANA: $5\% < \text{FOS} < 20\%$; $1.500\text{m}^3/\text{Ha} < \text{DV} < 6.000\text{m}^3/\text{Ha}$; $3,10\text{m} < \text{CU} < 3,3\text{m}$;
- BANDA NO URBANA: $\text{FOS} < 5\%$; $\text{DV} < 1.000\text{m}^3/\text{Ha}$; $\text{CU} < 3,10\text{m}$.

Por tanto, las muestras tanto del arbolado de alineación de calles como de los espacios verdes, se seleccionaron según su pertenencia a cada BUC.

a) Arbolado de Alineación

Además de la pertenencia a diferentes BUC, la identificación del arbolado de alineación a estudiar se basó en los nodos urbanos que desde la década del '90 se estudian urbanística y climáticamente. El mismo, consiste en la obtención anual y quinquenal de las características urbanísticas y climáticas respectivamente, del AMSJ realizadas por los autores, a partir del año 1993.

De los 24 nodos urbanos relevados, se seleccionó una muestra de 3 para su estudio de confort bioclimático. Los mismos fueron analizados bioclimáticamente, esto es, como Canales Viales Urbanos (CVU), por lo cual, las muestras poseen distintas relaciones H/W (altura promedio de edificación y ancho de calle) y se localizan en tres Bandas Urbanas Características diferentes. En la Figura 1 se presentan los cruces de CVU forestados con sus respectivos índices urbanísticos y arbóreos, en un espacio urbano de 100m x 100m.

b) Espacios Verdes Públicos

En trabajos previos sobre aporte bioclimático de los Espacios Verdes Urbanos públicos realizados por los autores, se trabajó sobre los únicos EVU cuya influencia bioclimática excedía su propia superficie, los cuales constituyen 19 espacios verdes. De los mismos, se seleccionaron 3 para su estudio de confort bioclimático, como muestra representativa de tres Bandas Urbanas Características. Estos son: EVU Yrigoyen en la BUC Eminentemente Urbana; EVU Belgrano en la BUC Urbana y EVU Villa Krause, en la BUC Suburbana. La Figura 2 y la Tabla 2 muestran los EVU analizados, junto a sus datos urbanísticos y arbóreos.

La Tabla 1 muestra un resumen de los Índices arbóreos en CVU y EVU calculados en función de los relevamientos efectuados.

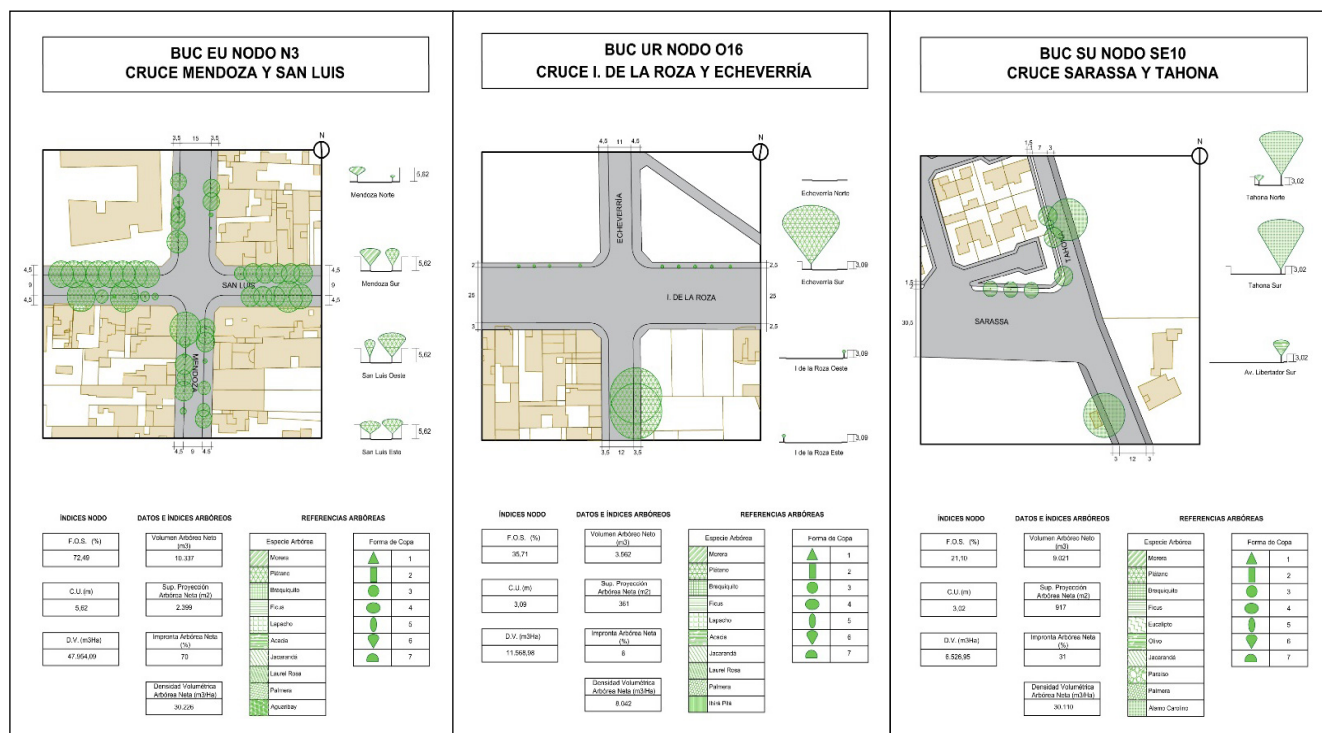


Figura 1. Cruces de Canales Viales Urbanos: identificación y valores índices urbanísticos y arbóreos. Relaciones H/W promedio: N3=0.25; H/W: O16=0.03; H/W SE10= 0.05. Porcentaje calle sobre superficie muestra: N3= 32%; O16= 44%; SE10= 30%. Elaboración propia.

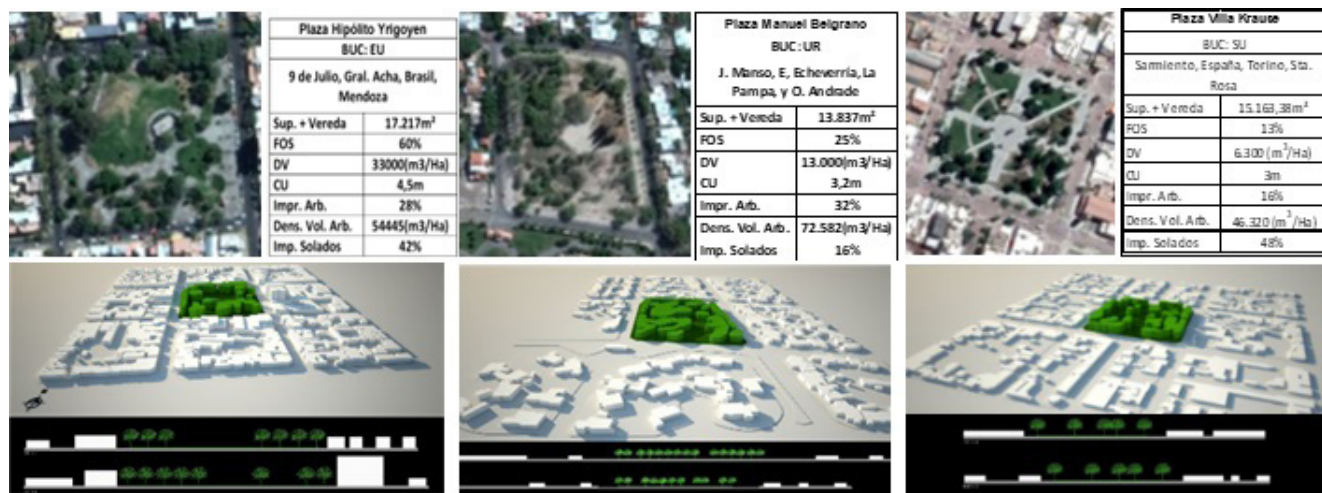


Figura 2. Planta, modelado en 3D e índices urbanísticos y arbóreos de tres EVU, pertenecientes a tres BUC. Elaboración propia.

4.2. Rangos y categorías del índice UTCI

El índice de confort UTCI define 10 escalas de estrés térmico, que abarcan desde el estrés por calor extremo al causado por mucho frío. La escala de valoración de Lilje-gren J. et al. (42) se presenta en Tabla 2.

4.3. Escenario 1: Método de cálculo del índice UTCI en CVU y EVU en situación actual con datos de simulación microclimática de estaciones meteorológicas de control

Para el cálculo del UTCI se utilizó el Programa UTCIWB-GT (43). El cálculo requiere la entrada de los siguientes datos: Temperatura del aire (°C); DTemperatura Radian-

te Media y Temperatura del Aire (°C); Humedad Relativa (%); Velocidad de viento (m/s). Los valores climáticos incorporados fueron los obtenidos in situ, trasladados al mediodía solar 12HSV = 13,30HOA.

Debido a que la fórmula del UTCI incorpora una velocidad de viento a 10m de altura, en caso de mediciones in situ como el presente, debe escalarse la velocidad registrada a la altura peatonal. Para ello, es necesario considerar la longitud de rugosidad aerodinámica urbana superficial del lugar en el que se realizaron las mediciones (zo) es decir, la elevación sobre la superficie del suelo en la cual la velocidad del viento tiende a cero, por efecto de los elementos rugosos.

Tabla 1. resumen de índices arbóreos de CVU y EVU estudiados. Elaboración propia.

ÍNDICES ARBÓREOS DE ÁREAS MUESTRA											
CVU	Sup. Proyecc. Arbórea	Volumen arbóreo	Impronta Arbórea	Densidad Volumétrica Arbórea	EVU	Sup. proyecci. Arbórea	Volumen arbóreo	Superficie Solados	Impronta Solados	Impronta Arbórea	Densidad Volumétrica Arbórea
	(m²)	(m³)	(%)	(m³/Ha)		(m²)	(m³)	(m²)	%	(%)	(m³/Ha)
N3	2.399	10.337	70	30.226	Yrigoyen	4.899	81.333	7.295,49	42	28	54.445
O16	361	3.562	8	8.042	Belgrano	4.370	84.105	2.274,20	16	32	72.582
SE10	917	9.021	31	30.110	Krause	2.498	63.795	7274,86	48	16	46.320

Tabla 2. Escala de Valoración UTCI, categorizado según el estrés térmico. Fuente: Liljegren J. et al (42).

RANGOS DE UTCI (°C)	CATEGORÍA DE ESTRÉS
sobre +46	ESTRÉS TÉRMICO EXTREMO
+38 a +46	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO
+32 a +38	ESTRÉS TÉRMICO SEVERO
+26 a +32	ESTRÉS TÉRMICO MODERADO
+9 a +26	SIN ESTRÉS TÉRMICO
+9 a 0	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO LEVE
0 a -13	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO MODERADO
-13 a -27	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO FUERTE
-27 a -40	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO MUY FUERTE
Debajo de -40	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO EXTREMO

parámetros de manera visual, aunque la interfaz gráfica y la usabilidad de la misma es bastante rudimentaria. El mismo módulo permitió realizar una extrusión del modelo 2D, para convertirlo en 3D, de acuerdo a los parámetros de los elementos que se incluyeron en la etapa 2D. Los árboles se generaron usando el módulo Albero, ya que lo modelos incluidos por defecto no coinciden con las características de las especies existentes en los CVU/EVU relevados. El módulo Albero permite diseñar especies vegetales incluyendo parámetros como altura, ancho de la copa, densidad foliar, profundidad y diámetro de la raíz, perennidad o caducidad, etc. Una vez que se contó con el modelo 3D, se realizó la configuración de las simulaciones utilizando el módulo EnviGuide, que permite seleccionar el modelo a simular y cargar parámetros tales como duración, hora de inicio, temperaturas diarias (máximas y mínimas), humedad relativa diaria (máxima y mínima) viento: dirección y velocidad diaria (máxima y mínima). Para cada área de estudio, se adoptaron los valores climáticos de la estación meteorológica de control, correspondientes al mismo día de mediciones in situ.

Los resultados de la simulación se procesan con el módulo Leonardo, que permite la presentación gráfica y el análisis de los datos. Para los CVU, se graficaron las temperaturas y vientos para cuatro alturas distintas: 0,2m: nivel del suelo; 1,4m: altura a la que se instalaron los sensores para la medi-

ción in situ; 3,0m: altura media de edificación; 5,0m: altura máxima promedio de las construcciones del entorno.

En el caso de los EVU, las alturas de corte fueron: 0,2m: nivel del suelo; 1,4m: altura peatonal a la que se instalaron los sensores para la medición in situ; 5m: altura máxima promedio edificaciones y 9m: valor promedio de altura máxima de los árboles en los EVU relevados. Además, se tuvo en cuenta el horario en el cual se realizaron las mediciones in situ, para representar el intervalo de tiempo más cercano a ese momento. Para permitir su análisis sincrónico con el cálculo del UTCI obtenido en el Escenario 1 y debido a que el programa ENVI simula horas enteras, las gráficas se presentan a la hora 14:00HSA, correspondiente a las 12:30HSV.

4.4. Escenario 2: método de cálculo del UTCI en CVU y EVU modificando sus índices arbóreos y con datos de simulación microclimática de estaciones meteorológicas de control

Para verificar y cuantificar mejoras en las condiciones micrometeorológicas en las calles, generadas por el arbolado de alineación y en los EVU, se propusieron diferentes escenarios a partir de la inclusión de variables directamente referidas a los Indicadores Bioclimáticos de Verde Urbano para zonas áridas propuestos por Kurbán, A. et al (8) y Kurbán, A. (10), Tablas 3 y 4.

El procedimiento seguido, fue realizar nuevas simulaciones micrometeorológicas en los mismos CVU muestra y EVU estudiados. En el caso de los CVU, se aumentó la Impronta Arbórea, conforme el Indicador Bioclimático de AA respectivo. En el caso de los EVU, se incrementó la cobertura arbórea y se disminuyó la impronta de senderos peatonales; todo ello en función de los Indicadores Bioclimáticos de EVU.

Para cada CVU y EVU, los valores adoptados fueron:

- CVU: se adoptó el Indicador Bioclimático de Impronta Arbórea mínima (75%) para calcular los nuevos valores e índices urbanísticos de: Superficie Arbórea simulada, Superficie Arbórea Neta simulada y Volumen Arbóreo Neto simulado (Tabla 5). Se procedió a dibujar en ACAD, las nuevas superficies y volúmenes, incorporándolos al modelado en 2D en el módulo Spaces del software Envi-met para luego convertirlo en 3D, ingresado también la altura promedio arbórea.

- a. EVU: se adoptaron Indicadores Bioclimáticos de Impronta Arbórea mínima (39%); Impronta de Solado máxima (24%) y Densidad Volumétrica Arbórea mínima de 20.000m³/Ha, para calcular los nuevos valores e índices urbanísticos de: Superficie Arbórea simulada, Superficie solados simulada, Volumen Arbóreo simulado, Impronta Arbórea simulada, Impronta solados simulado y Densidad Volumétrica Arbórea simulada (CVU en Tabla 5 y EVU en Tabla 6).

4.5. Simulaciones canales viales urbanos: escenarios 1 y 2

En las figuras 3, 4 y 5, se presentan los tres CVU estudiados, con sus respectivas simulaciones térmicas y húmidicas de la situación actual (escenario 1), la mejorada (escenario 2 de acuerdo con índices bioclimáticos de Kurbán et al. (13).

Tabla 3. Indicador Bioclimático de Arbolado Alineación de calles (8).

INDICADOR BIOCLIMÁTICO CVU	OBJETIVO	CÁLCULO y UNIDAD DE MEDIDA	VALOR
IMPRONTA ARBÓREA NETA	Proveer la sombra arbórea que asegure efecto higrotérmico en calle (calzada y vereda).	(Sup. proyección copa arbórea s/plano horizontal x Coeficiente de superposición arbórea) / Sup. Total calzada + vereda) x 100 = %	Mínimo: 75%

Tabla 4. Indicadores Bioclimáticos de EVU (10).

INDICADOR BIOCLIMÁTICO EVU	OBJETIVO	CÁLCULO y UNIDAD DE MEDIDA	VALOR
IMPRONTA ARBÓREA	Proveer la sombra arbórea que asegure efecto higrotérmico en el EVU y su entorno urbano.	Sup. proyección copa arbórea s/plano horizontal / Sup. Total EVU) x 100 = %	Mínimo: 39%
IMPRONTA SOLADOS	Disminuir el albedo y superficies impermeables, para no incrementar la temperatura ambiente.	(Sup. solados EVU / Sup. Total EVU) x 100 = %	Máxima: 24%
DENSIDAD VOLUMÉTRICA ARBÓREA	Incrementar la masa vegetal para asegurar el aporte higrotérmico.	Volumen arbóreo EVU / Sup. Total EVU = m ³ /Ha	Mínima: 20.000 m ³ /Ha

Tabla 5. Valores e Índices Arbóreos actuales y Simulados en EVU (nuevos valores en celda color verde). Elaboración propia.

CVU	Valores e Índices Arbóreos Actuales								Índices Arbóreos Simulados					
	Sup. calles	Sup. Proy. Arbórea	Sup. Proy. Arbórea neta	Volumen Arbóreo	Volumen Arbóreo Neto	Imp. Arb. Neta	DV arb. Neta	Altura promedio árboles	Sup. Proy. Arbórea	Sup. Proy. Arbórea Neta	Volumen Arbóreo	Volumen Arbóreo Neto	Imp. Arb. Neta	Altura Prom. árboles
	(m ²)	(m ²)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(%)	(m ³ /Ha)	(m)	(m ²)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(%)	(m)
N3	3.420	3.067	2.399	13.238	10.337	70	30.226	8.7	3.285	2.570	14.184	11.074	75	8.7
O16	4.429	999	361	10.156	3.562	8	8.042	6.8	9.364	3.384	95.212	33.934	75	6.8
SE10	2.996	917	917	9.021	9.021	31	30.110	10.3	2.219	2.219	21.825	21.825	75	10.3

Tabla 6. Valores e Índices Arbóreos actuales y Simulados en EVU (nuevos valores en celda color verde). Elaboración propia.

EVU	Valores e Índices Arbóreos Actuales								Valores e Índices Arbóreos Simulados						
	Superficie	Sup. Pro. Arbórea	Superficie Solados	Volumen arbóreo	Imp. Arb	Impr. Solados	Densidad Volum. arb.	Altura promedio ponderada	Sup. Pro. Arbórea	Sup. Solados	Volumen arbóreo	Impr. Arbórea	Impronta Solados	Densidad Volumétrica Arbórea	Altura prom. ponderada árboles
	(m²)	(m²)	(m²)	(m³)	(%)	(%)	(m³/Ha)	(m)	(m²)	(m²)	(m³)	(%)	(%)	(m³/Ha)	(m)
Y	17.217	4.899	7.295	81.333	28	42	54.445	12.3	6.824	4.140	113.285	39	24	65.798	12.3
B	11.588	4.370	2.274	84.105	32	20	72.582	8.3	5.326	2.274	84.105	39	20	88.459	8.3
K	14.767	2.498	7.275	77.287	16	49	46.320	9.6	6.089	3.544	77.287	39	24	112.905	9.6

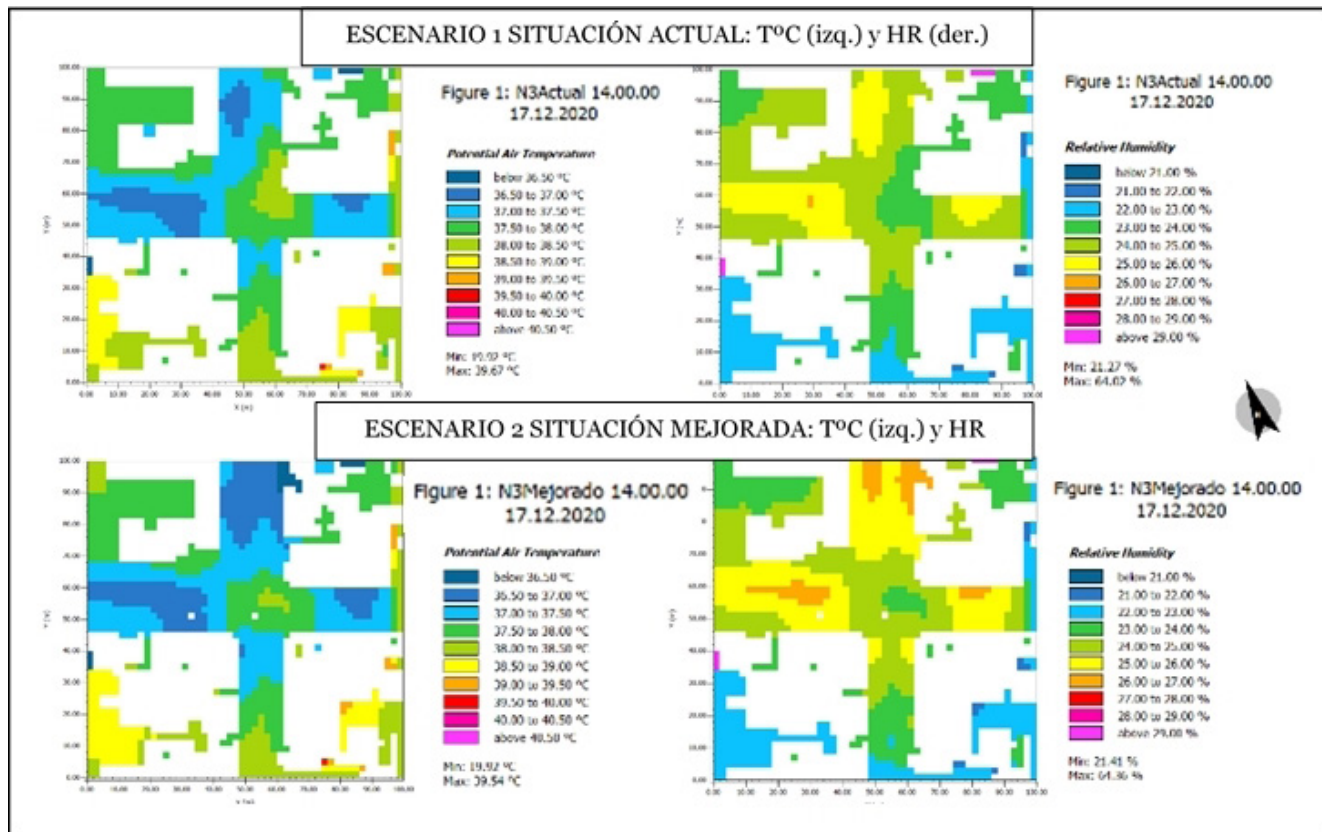
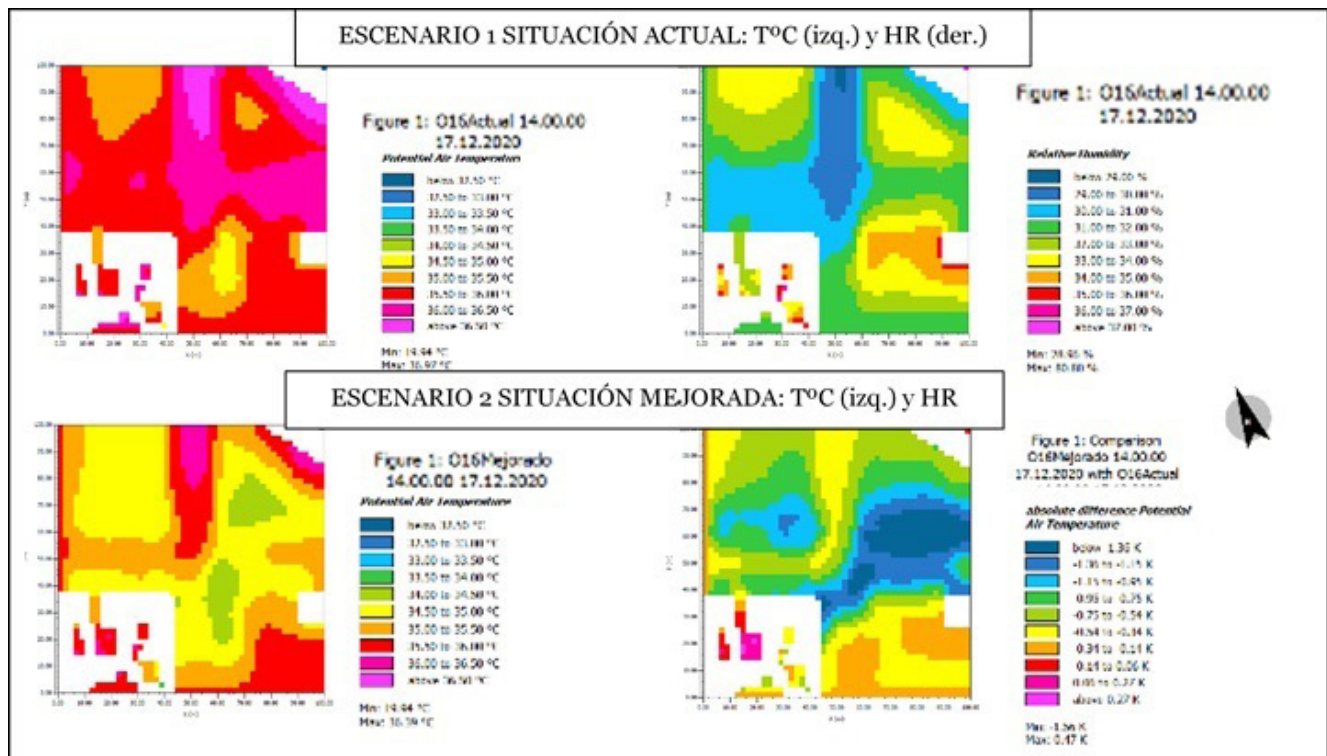


Figura 3. Simulación térmica y húmedica, escenarios 1 y 2; software ENVI-met 5.03 CVU N3; FOS 72%. Cortes horizontales altura peatón 1,4m. Elaboración propia.



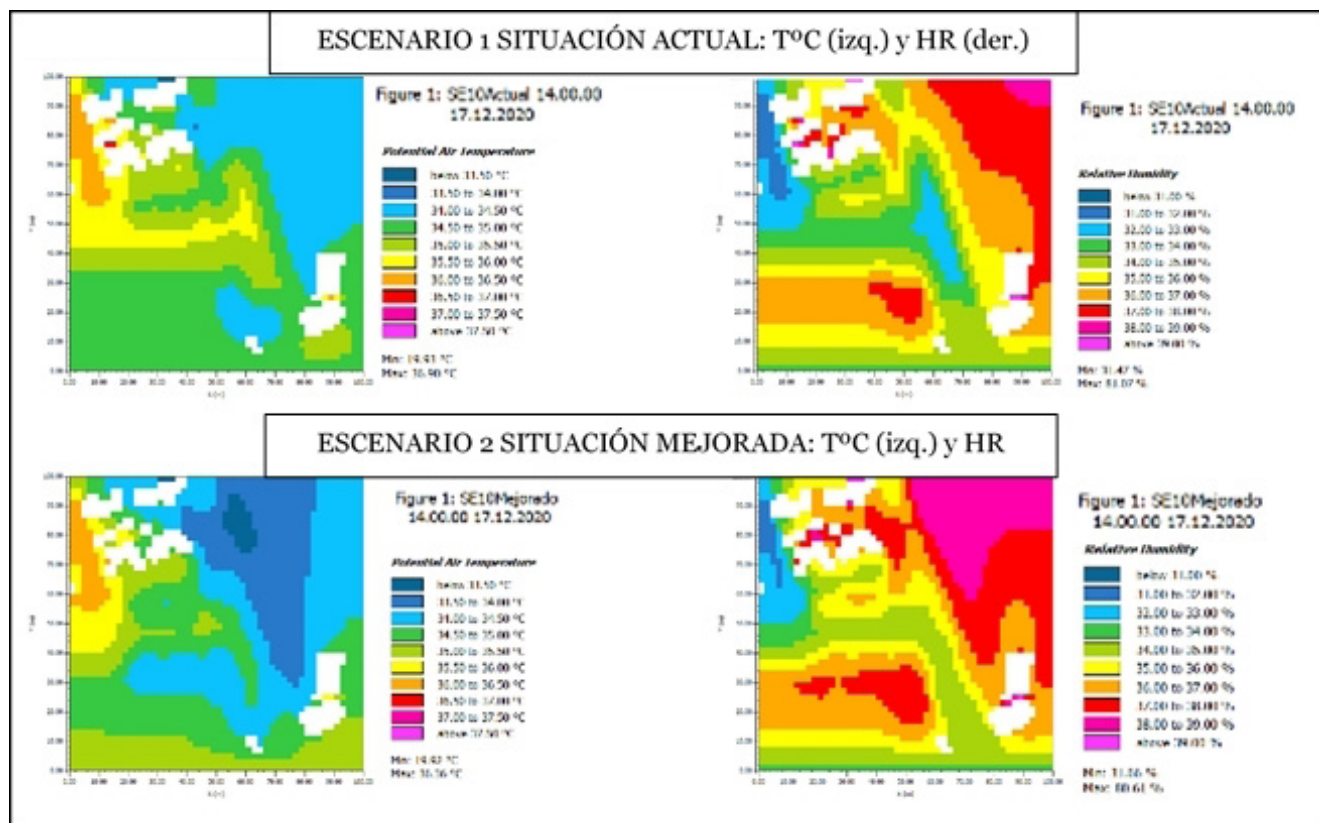


Figura 5. Simulación térmica y húmedica, software ENVImet 5.03 CVU SE10: FOS 21%. Cortes horizontales altura peatón 1,4m. Elaboración propia.

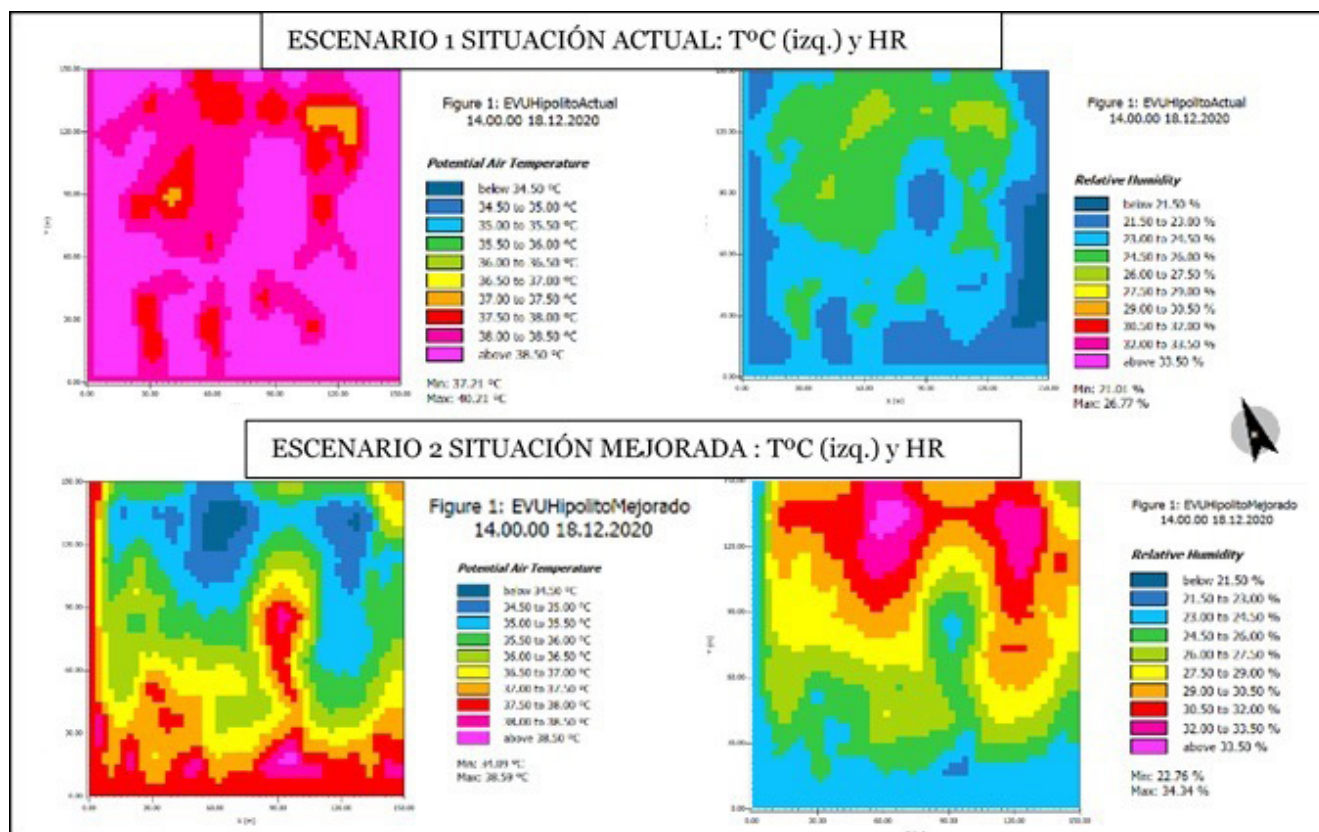


Figura 6. Simulación térmica y húmedica, software ENVImet 5.03 EVU H Yrigoyen: FOS 60%. Cortes altura peatón 1,4m. Elaboración propia.

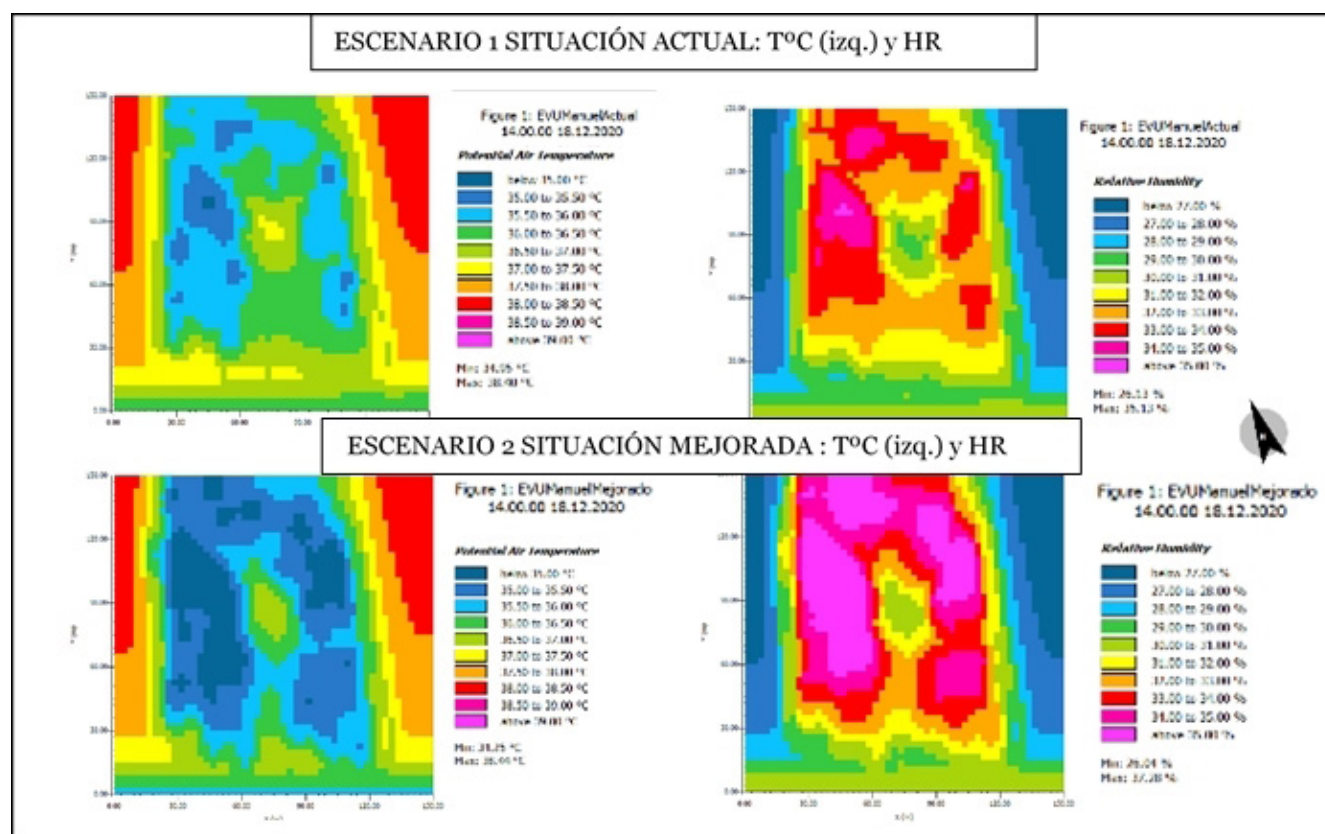


Figura 7. Simulación térmica y húmeda, software ENVImet 5.03 EVU M. Belgrano: FOS 25%. Cortes altura peatón 1,4m. Elaboración propia.

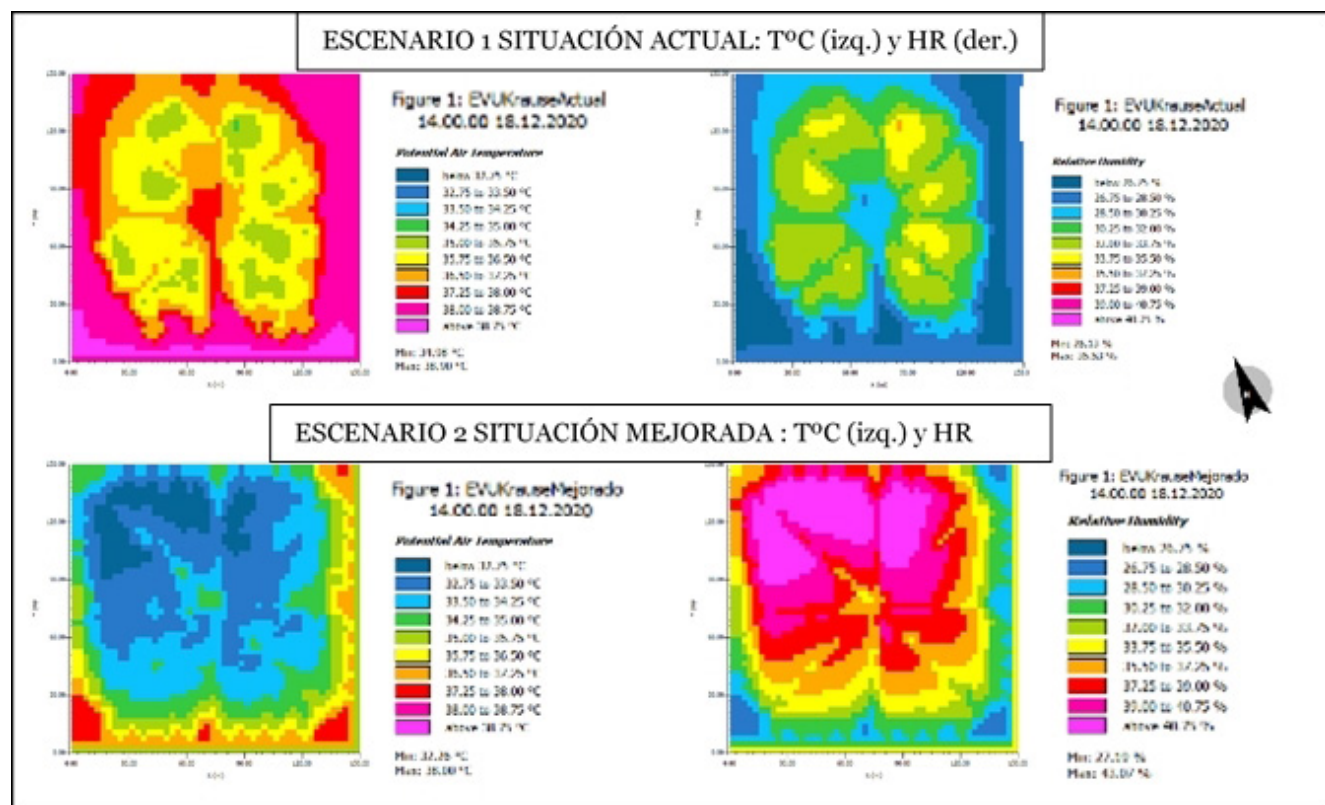


Figura 8. Simulación térmica y húmeda, ENVImet 5.03 EVU V. Krause: FOS 13%. cortes altura peatón 1,4m. Elaboración propia.

Tabla 7. diferencias de T°C, HR% y Vm/s, entre los escenarios 2 (mejorado) y 1 (actual). Elaboración propia.

Diferencias de variables climáticas en Escenario 2 (mejorado) y Escenario 1 (actual)							
CVU	Temperatura (°C)	Humedad (HR)	Viento (m/s)	EVU	Temperatura (°C)	Humedad (HR)	Viento (m/s)
N3	-1,64	2,84	-1,25	Yrigoyen	-4,89	8,63	0,86
O16	-2,03	5,04	-1,11	Belgrano	-1,56	3,69	0,63
SE10	-2,11	6,73	-1,32	Krause	-5,27	13,67	0,74
Totales	-1,93	4,87	-1,23		-3,91	8,66	0,74

4.6. Simulaciones espacios verdes urbanos: escenarios 2 y 3

En las figuras siguientes, se presentan los tres EVU estudiados, con sus respectivas simulaciones térmicas y húmedas de la situación actual (Escenario 1) y la mejorada (Escenario 2 de acuerdo con los citados Índices Bioclimáticos de Kurbán et al. (10): Figura 6, Plaza H. Yrigoyen: *FOS 60%*; Figura 7, Plaza M. Belgrano: *FOS 30%* y Figura 8, Plaza Villa Krause: *FOS 25%*.

5. RESULTADOS

5.1. Diferencias entre las variables climáticas en escenarios 2 y 1

La Tabla 7 presenta las diferencias de temperatura, humedad relativa y viento, resultantes de las simulaciones entre los Escenarios 2 (situación mejorada) y Escenario 1 (situación actual).

5.2. Cálculo del utci en los cvu y evu: escenarios 1 y 2

La Tabla 8, presenta los índices UTCI calculados con las variables extraídas de las simulaciones para los Escenarios 1 y 2, sometidos a la simulación con ENVI-met 5.03.

5.3. Discusión de resultados

La incidencia del pavimento en los CVU, con un sombreado del 75% de su superficie, influye marcadamente en la disminución del efecto térmico y húmedo de la forestación. Esta incidencia se reduce conforme decrece la re-

lación H/W. Respecto a la velocidad del viento, la menor relación de H/W, hace decrecer la diferencia entre los CVU estudiados, no obstante, por las características morfológicas de los canales, se generan reducciones que superan 1m/s. En los EVU la menor incidencia de superficies impermeables se traduce en mayores diferencias de temperatura y humedad. Por su parte y con relación al viento, las relaciones espaciales de los mismos no generan cambios sustantivos en el movimiento del aire. Respecto al índice UTCI, en los CVU el confort térmico se incrementa ante menores relaciones de H/W, siendo esta proporción de importante incidencia, aún con las mismas condiciones de densidad de forestación. En los EVU, el mejoramiento de los índices arbóreos y de solados, no tuvo mayor incidencia en el índice UTCI, lo cual indica que los valores adoptados en el Escenario 2, deben revisarse a fin de incrementar el beneficio que significan para el confort humano.

6. CONCLUSIONES

La Isla de Calor y la Depresión Húmeda, principales fenómenos del Clima Urbano, inciden muy negativamente en el confort de los espacios abiertos, particularmente durante el verano. Al respecto, en los últimos 30 años la superficie del Área Metropolitana de San Juan se ha incrementado en un 150%, aumentando su masa térmica y con ella, la intensidad de la Isla de Calor en un 70%.

Por ello, la cuantificación del confort térmico constituye una importante herramienta para la toma de decisiones de Urbanismo Bioclimático, ya que posee efectos multiplicadores en la calidad de vida de la población en los espacios públicos, más aún en el caso de ciudades locali-

Tabla 8. Valores del índice UTCI para los Escenarios 1 y 2; Diferencias y Promedios. Elaboración propia.

ÁREAS	DENOMINACIÓN	UTCI (°C)					
		ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		DIFERENCIAS E1 y E2	PROMEDIO DIFERENCIAS
		Actual simulado	Categoría de Stress	Mejorado simulado	Categoría de Stress		
CVU	N3	40,8	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO	40,5	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO	-0,3	-3,5
	O16	38,3		37,5	ESTRÉS TÉRMICO SEVERO	-0,8	
	SE10	39,4		30,1	ESTRÉS TÉRMICO MODERADO	-9,3	
EVU	Plaza H. Yrigoyen	41,6	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO	38,6	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO	-3	-2,0
	Plaza M. Belgrano	39,4		39	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO	-0,4	
	Plaza Villa Krause	39,7		37,1	ESTRÉS TÉRMICO SEVERO	-2,6	

zadas en ambientes áridos, como es el caso de la ciudad de San Juan.

Junto con otros elementos de sistema urbano, la forestación pública sufre periódicamente los efectos climáticos propios del ambiente árido, como también los antrópicos, derivados estos últimos de su escasa consideración (tanto pública como privada) como morigeradores de la rigurosidad del clima urbano.

El trabajo analiza una muestra de calles forestadas y espacios verdes públicos, en los cuales se calcula el índice bioclimático para espacios abiertos UTCI, con datos climáticos registrados *in situ* y con los obtenidos con la aplicación del software ENVI-met 5.03, de simulación micrometeorológica. Dichas simulaciones se realizaron con los datos arbóreos actuales y luego mejorando sus condiciones con los Indicadores Bioclimáticos de Verde Urbano para zonas áridas (8) y (10). Se demostró cuantitativamente que, a nivel peatonal, las condiciones micrometeorológicas de un espacio urbano pueden variar interviniendo en muy pocos elementos del tejido urbano; por ejemplo, forestación y peatonales.

Al respecto, en los CVU se obtuvieron diferencias promedio de UTCI de $-3,5^{\circ}\text{C}$, oscilando entre los $0,3^{\circ}\text{C}$ y los $9,3^{\circ}\text{C}$. Asimismo, con una mayor relación de H/W, se incrementa el valor de UTCI; es decir que este índice aumenta cuando los cañones urbanos son de mayor altura. Se observa además que, ante mayor valor en la Isla de Calor, crece la importancia del arbolado de alineación, por lo que sería necesario segmentar el valor del Indicador de Impronta Arbórea, para estudiar su posible aumento en áreas urbanas con mayor factor de ocupación del suelo y densidad volumétrica edilicia.

Respecto a los EVU, las disminuciones en los valores de UTCI promediaron los -2°C y estuvieron comprendidas entre los $0,4^{\circ}\text{C}$ a 3°C , sin relación aparente con la Isla de Calor urbana.

Se concluye, que es posible realizar cambios cuali y cuantitativos tanto en el arbolado de alineación de los CVU como en los EVU readecuando sus respectivos diseños en función de indicadores bioclimáticos que contemplen las condiciones del clima urbano árido, colaborando desde el Urbanismo Bioclimático con el mejoramiento de las condiciones de vida urbana.

REFERENCIAS

- (1) UNESCO (2010). *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*. Documento Técnico N°5. París.
- (2) Papparelli, A., de Rosa, C., Kurbán, A., Cúnsulo, M., Lelio, G., Vilapriño, R., Solanes, F. (2001). *Arquitectura y clima en zonas áridas*. ISBN 950-605-136-4. Editorial Fundación UNSJ. San Juan.
- (3) Oke, T. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 179-190.
- (4) Mazzeo, N. (1984). *Aplicaciones del diagnóstico climático a problemas relacionados con el urbanismo*. UBA. Buenos Aires.
- (5) Papparelli, A., Kurbán, A., Cúnsulo, M. (2009). *Planificación sustentable del espacio urbano*. ISBN 978-987-584-196-3. Editorial Klickowski/NOBUKO, Argentina.
- (6) Stewart, I. y Oke, T. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900. Vancouver. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- (7) Garland, L. (2011). Heat islands. London: Earthscan.
- (8) Kurbán, A., Papparelli, A., Cúnsulo, M., (2004). Measurements of de Bioclimatic Effects of Groups of trees. *Argentinian Arid City. Asc. Rev.* 47(4), 339-346. Univ. Sydney. ISSN 0003 – 8628. <http://doi.org/10.1080/00038628.2000.9697543>
- (9) Kurbán, A., Cúnsulo, M., (2015). Estudio del efecto térmico de espacios verdes urbanos del árido c/ sensores remotos. *Hábitat Sustentable*, 5(2), 42–55. ISSN 0719-0700; Univ. Bío Bío. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1932>
- (10) Kurbán, A. (2017). Verde urbano. Contribución bioclimática a la sustentabilidad de ambientes áridos. UNSJ – FAUD. ISBN: 978-987-3984-40-2. Recuperado de http://www.faud.unsj.edu.ar/descargas/publicaciones/Verde_Urbano_%20A_KURBAN.pdf
- (11) Kurbán, A., (2017). Bioclimatic urban green indicator for the sustainability of cities in arid environment. *IJAST – Int. Journal of Applied Sc. and Tech.* ISSN 2221-0997 (Print), 2221-1004 (Online), 7(2), Editorial Center for Promoting Ideas, USA. http://www.ijastnet.com/journals/Vol_7_No_2_June_2017/4.pdf
- (12) Kurbán A., Cúnsulo, M., (2017). Confort térmico en espacios verdes urbanos en ambientes áridos. *Hábitat Sustentable*, (7)1, 32-41. ISSN 0719-0700, Editorial Univ. de Bío Bío .
- (13) Kurbán, A., Cúnsulo, M., (2017). *Teledetección y efecto térmico de espacios verdes urbanos en el árido*. ISBN 978-3-659-65825-9. Ed. EAE.
- (14) Jendritzky, G., et al. (2002). An update on the development of a universal thermal climate index. En *15th Conf. Biomet. Aerobiol. and 16th ICB02*, 27 Oct – 1 Nov 2002 (pp. 129-133). Kansas City, AMS.
- (15) Jendritzky, Gerd (2012). UTCI: Universal Thermal Climatic Index. *Working Group 1 Thermophysiological Modelling and Testing' of Cost Action 730*. Alemania.
- (16) Jendritzky, G., et al. (2001). Looking for a Universal Thermal Climate Index UTCI for Outdoor Applications. En *Wind-sor-Conference on Thermal Standards*, April 5-8, 2001, Windsor, UK.
- (17) Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int. J. Biometeorol.* 56, 515–535 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- (18) Nassiri, P., Monazzam, M., Golbabaie, F., Dehghan, S., Rafieepour, Q., Mortezaipoor, A., Asghari, A. (2017). *Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessment of occupational heat stress in open-pit mines*. Ind. H. <http://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0018>
- (19) Krüger, E. (2021). *Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology. Latest developments and case studies*. Springer Nature Switzerland.

- (20) City London Government UK (2020). *Guidelines for developments in the City of London*. Recuperado de <https://www.cityoflondon.gov.uk>.
- (21) Honjo T., Takakura T. (1989). Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. *Energy and Buildings*, 15, 443-446. Elsevier Sequoia. Holanda.
- (22) Arnfield, A. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- (23) Masson V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol*, 94(3), 357-397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- (24) Johnsson G., Hunter L. (1995). A numerical study of dispersion of passive scalars in city canyons. *Boundary-Layer Meteorol*, 75(3), 235-262. <https://doi.org/10.1007/BF00712696>.
- (25) Mills G. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon I. Model structure and sensitivity test. *Atmos. Environ*, 27B(2), 157-170. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(93\)90002-N](https://doi.org/10.1016/0957-1272(93)90002-N).
- (26) Soo-Gon H, Sun-Hye M, Jung-Ho H. (2007). Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. *Proceedings Building Simulation*, 1131-1138.
- (27) Teller J, Azar S. (2001). Townscope II - A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy*, 70(3), 187-200. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00097-9).
- (28) Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. (2004). Thermal design tool for outdoor space based on numerical simulation system using 3D-CAD. *Proc. 21th Int. Conf. on PLEA*, (pp. 2). Eindhoven. Netherlands.
- (29) ENVI-met 5.03. *Journal Biometeorology*, 56, 421-428. Recuperado de <https://www.envi-met.com/es/>.
- (30) Soo-Gon H, Sun-Hye M, Jung-Ho H. (2007). Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. *Proceedings Building Simulation*, 1131-1138. https://www.researchgate.net/publication/237210817_Changes_of_the_micro-climate_and_building_cooling_load_due_to_the_green_effect_of_a_restored_stream_in_Seoul_Korea
- (31) Samaali M., Courault D., Bruse M., Oliosio A., Occelli R. (2007). Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research*, 85(2), 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.005>.
- (32) Acero J. (2010). Influencia de la vegetación en la calidad del aire y el clima urbano. *CONAMA*, 1,1-13.
- (33) Chowa W, Brazel, A. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47,170-181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.027>.
- (34) Perini K., Magliocco A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry and Urban Greening*. 13(3), 495-506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- (35) Taleghani M., Kleerekoper M., Tenpierik M., Dobbeltstein A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.
- (36) Tanhuanpää T., Vastaranta M., Kankare V. Holopainen M., Hyyppä J., Hyyppä, Alho P., Raisio J. (2015). Mapping of urban roadside trees -a case study in the tree register update process in Helsinki City. *Urban Forestry and Urban Greening*.
- (37) Arnfield, A. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- (38) Alchapar, N., Correa, E. (2016). Potencial de las Herramientas d/Simulación p/l/Planificación Sustentable del Desarrollo Urbano. *ENCACs 2016 Encuentro Nac. Ciudad, Arq. y Const. Sustentable*. UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/59417>
- (39) Kurbán A. (2017). Adaptabilidad bioclimática arbórea en ambientes áridos urbanos. *Revista ERMA Energías Renovables y Medio Ambiente*, 40. ISSN 0328-932X. Ed. ASADES.
- (40) Papparelli, A., Kurbán, A., Cúnsulo, M., Montilla, E., Herrera, C. (1997). Variación higrótérmica entre área urbana y no urbana en una zona arida: Ciudad de San Juan. *AVERMA*: ISSN 0329-5184. 1(1), 225 a 228.
- (41) Cúnsulo, M., Kurbán, A., Montilla E., Ortega A., Tosetti, S. (2022). Clima urbano árido: isla de calor y depresión húmica del AMSJ: año 2020. *Informe Técnico Proyecto CICITCA – UNSJ*. Cód. 21/A0949.
- (42) Liljegren J., Carhart R., Lawday P., Tschopp S. (2003). Glossary of Terms for Thermal Physiology. *Journal of Thermal Biology*.
- (43) Programa UTCIWBGT. Planilla <http://www.utci.org/utcineu/utcineu.php>.
- (44) Palese; C., Apcarian, A., Lassig, J. (2008). Mapa de rugosidad aerodinámica superficial de la ciudad de Neuquén. Conferencia en *Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento*. Montevideo. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2454.4800>.
- (45) Suisse Éole. The Swiss Wind Power. Tools, Wind Profile. Data Website <http://www.wind-data.ch>.