Uso de paraguas como protección solar del espacio urbano. Águeda, Portugal.

Adaptación del hábitat urbano al calentamiento global en La Habana. Propuestas de transformación

Adaptation of Urban Habitat to Global Warming in Havana. Transformation Proposals

Dania González-Couret, Natalí Collado-Baldoquin, Dayra Gelabert-Abreu, Lázaro Yerandy Morales-Camacho y Luis Alberto Rueda-Guzmán

RESUMEN: En el presente artículo se exponen las estrategias de transformación del espacio urbano más recomendadas para una mejor adaptación al calentamiento global según los resultados de una investigación encaminada a identificar, caracterizar y evaluar los tipos morfológicos en La Habana de acuerdo con su microclima térmico. A partir del marco teórico elaborado en la primera etapa de trabajo, se desarrolló la investigación empírica que permitió identificar 27 tipos morfológicos en la ciudad, de los cuales se seleccionaron doce para el desarrollo de tres campañas de monitoreo del ambiente térmico. Los resultados permitieron clasificar los tipos morfológicos en cuatro grandes grupos, según su comportamiento microclimático, como base para la identificación de las principales estrategias de transformación a proponer en cada caso. El impacto de algunas soluciones propuestas fue simulado con en software ENVImet, previamente validado en comparación con los valores monitoreados.

PALABRAS CLAVE: tipos morfológicos; microclima térmico; adaptación al cambio climático; La Habana

ABSTRACT: This article presents the most recommended transformation strategies for a better adaptation to global warming according to the results of a research aimed at identifying, characterizing and evaluating the morphological types in Havana according to its thermal microclimate. Based on the theoretical framework developed in the first stage of the work, empirical research was conducted, allowing the identification of 27 morphological types in the city, of which 12 were selected for the development of 3 thermal environment monitoring campaigns. From the results, the morphological types were further classified into four large groups, according to their microclimatic behavior, as a basis for the identification of the main transformation strategies to be proposed in each case. The impact of some proposed solutions was simulated with ENVImet software, previously validated against the monitored values.

KEYWORDS: morphological types; thermal microclimate; adaptation to global warming; Havana

RECIBIDO: 17 julio 2024 ACEPTADO: 30 agosto 2024

Introducción

El aumento de la temperatura como consecuencia del cambio climático que vive el planeta ocasionará importantes impactos en sectores como la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas, la salud humana y el consumo de energía, entre otros [1]. Un incremento de 2°C (en lugar de 1,5°C) ocasionaría la pérdida de prácticamente todos los arrecifes de coral e inducirá importantes cambios en "activos ambientales" como la biodiversidad y las playas, claves para la economía de las islas caribeñas que dependen del turismo [2].

Con respecto a la línea base (1961-1990), la temperatura superficial promedio del aire en Cuba se ha incrementado en 0,9 °C, y la mínima promedio en 1,9 °C, con una disminución significativa del rango diurno. También ha aumentado la frecuencia de sequías prolongadas y severas, especialmente en el verano, y las grandes precipitaciones en invierno, y se ha reducido en un 10 % la precipitación anual. Como resultado del cambio climático, para el 2050 se prevén incrementos de la temperatura media anual entre 1,9 °C y 2,5 °C según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente [3].

Por otro lado, según la directora ejecutiva de ONU-Hábitat, Maimunah Mohd Sharif, las ciudades constituyen la principal causa del cambio climático, pero también pueden formar parte de la solución, de manera que el futuro de la humanidad se juega en las ciudades [4]. Y es que el cambio climático se ve reforzado en estas por la presencia de fenómenos como la isla de calor urbana (ICU) [5], la contaminación atmosférica, la impermeabilización del suelo y el bajo albedo [6].

En los últimos 65 años, alrededor del 60 % de la población urbana del planeta ha experimentado un calentamiento local de 1,2 °C, que equivale al doble del efecto global por el cambio climático en ese mismo periodo (0,6 °C). Los impactos económicos producidos por la urbanización a través de la denominada isla de calor serían 2,6 veces mayores que aquellos que se obtendrían midiendo únicamente el cambio climático global [7]. Por tanto, se estima que su efecto negativo, en lo que a la temperatura se refiere, será el doble en las ciudades que en el campo [8], y mediante simulaciones, se ha estimado que, para el periodo 2041-2075, el impacto del calor en estas se multiplicará por cuatro [9]. Sin embargo, en el informe realizado por Ijjasz-Vasquez et al. en 2021 [10], se demuestra que invertir en la adaptación al cambio climático puede generar beneficios cuatro veces superiores al costo de inversión.

Sobre esta base es posible afirmar que la adaptación de las ciudades al calentamiento global constituye una necesidad inminente, y entre las posibles vías para lograrlo, el incremento del verde urbano es una de las más reconocidas a nivel global [11, 12], con importantes beneficios no solo en la reducción de las temperaturas,

[1] CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) / CAC-SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana) (2020), Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. Ciudad de México: CEPAL; 2020. Disponible en: https://hdl.handle.net/11362/46499.

[2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available in: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

[3] Planos Gutiérrez EO. Informe: Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La Habana: CITMA / AMA; 2020,

[4] ONU (Organización de Naciones Unidas) El futuro de la humanidad se juega en las ciudades. Noticias ONU [Internet]. 26 Febrero 2019 [consultado: 10 de julio de 2024]. Disponible en: https://news.un.org/es/story/2019/02/1451862.

[5] Gilabert Mestre J. Cubiertas urbanas y comportamiento térmico en escenarios de temperaturas extremas del dato al geoservicio [tesis doctoral]. Barcelona: Universitat de Barcelona; 2021. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=304379.

[6] Arellano Ramos B. Cambio climático, planeamiento y urbanismo. En: CTV XIII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual. Barcelona: Universitat Politècnica; 2019. Disponible en: https://revistes.upc.edu/index.php/CTV/article/view/9651.

[7] Estrada F, Botzen WJW, Tol RSJ. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. Nature Climate Change [Internet]. 2017 [cited: month day, year]; 7(6): 403-406. Disponible en: https://doi.org/10.1038/nclimate3301.

[8] Wouters H, De Ridder K, Poelmans L, Willems P, Browers J, Hosseinzadehtalaei P, et al. Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region. Geophysical Research Letters [Internet]. 2017 [cited: July 10, 2024]; 44(17): 8997-9007. Disponible en: https://doi.org/10.1002/2017GL074889.

[9] Sánchez Solís A. El calentamiento global afectará a las ciudades el doble que al campo. La Vanguardia. Sociedad. Cambio Climático [Internet]. 24 Abril 2017 [consultado: 10 de julio de 2024]. https://www.efe.com/efe/america/sociedad/el-calentamiento-global-afectara-a-las-ciudades-doble-que-al-campo/20000013-3246785

[10] Ijjasz-Vasquez E, Saghir J, Noble I. State and Trends in Adaptation Report 2021 [Internet]. Global Center on Adaptation. 25 October 2021 [cited: July 10, 2024]. Available in: https://gca.org/wp-content/uploads/2022/08/GCA_STA_2021_Complete_website.pdf

[11] Zhou W, Yu W, Wu T. An alternative method of developing landscape strategies for urban cooling: A threshold-based perspective. Landscape and Urban Planning [Internet]. 2022 [cited: July 10, 2024]; 225: 104449. Available in: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104449.

[12] Kinnunen A, Talvitie I, Ottelin J, Heinonen J, Junnila S. Carbon sequestration and storage potential of urban residential environment – A review. Sustainable Cities and Society [Internet]. 2022 [cited: July 10, 2024]; 84(2016): 104027. Available in: https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104027.

sino también en la disminución del efecto de las inundaciones, la absorción de CO_2 y la seguridad alimentaria, entre otros.

Casi el 80 % de la población cubana habita en ciudades, donde el efecto de la isla de calor urbana agrava las condiciones de un clima cálido y húmedo. Aunque existen estudios precedentes sobre el microclima urbano de La Habana, este no es uniforme, ya que responde a su variada morfología.

En el presente artículo se exponen las estrategias de transformación más recomendadas para una mejor adaptación al calentamiento global según buenas prácticas internacionales conocidas y los resultados de una investigación encaminada a identificar, caracterizar y evaluar los tipos morfológicos en La Habana de acuerdo con su microclima térmico.

Materiales y métodos

En la primera etapa de la investigación se aplicaron los métodos de la investigación teórica, para identificar las variables que condicionan la influencia de la morfología urbana en el microclima térmico [13]: vías, masa edificada, y modificadores (orientación, materiales de construcción y terminación, y vegetación). Sobre los dos últimos modificadores mencionados, es decir, los materiales y la vegetación, es posible actuar mediante transformaciones encaminadas a reducir el impacto de la morfología sobre la isla de calor urbana, sin transformarla.

Teniendo en cuenta esto, se desarrolló la etapa empírica de la investigación, comenzando con un trabajo de campo que permitió identificar 27 tipos morfológicos en La Habana, caracterizarlos y hacer una evaluación cualitativa preliminar de su posible desempeño térmico [14], a partir de lo cual fueron seleccionados 12 casos de estudio cuyo ambiente térmico exterior fue monitoreado en tres campañas realizadas en los meses de mayo, junio y julio de 2023 (Figura 1).

Figura 1. Casos de estudio monitoreados en La Habana. Fuente: Elaboración Propia.

En cada caso se escogió una zona con un área de aproximadamente 16 ha, en la cual se diseñó un recorrido peatonal de 1 km de longitud, a transitar en aproximadamente 2 horas, con paradas de 10 minutos en 10 puntos seleccionados, según las condiciones de sus parámetros morfológicos y modificadores, en aras de comparar los resultados.

Los recorridos se realizaron de forma simultánea en seis zonas urbanas, los días 3, 9, 16 y 23 de mayo de 2023, y en otras seis, del 20 al 22 de junio y de julio del propio año. Cada día se efectuaron tres recorridos, en los horarios de la mañana (9:00 a 11:00), la tarde (12:30 a 14:30), y la noche (18:00 a

[13] González Couret D, Collado Baldoquín N, De la Paz Pérez GA, Rueda Guzmán LA. Urban variables for adaptation to global warming in a hot-humid climate. Cuban cities as a case study. Urban Climate [Internet]. 2023 [cited: July 10, 2024]; 51: 101633. Available in: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101633.

[14] González Couret D, Morales Camacho LY, Collado Baldoquín N, Gelabert Abreu D, Rueda Guzmán LA. Tipos morfológios y microclima urbano en La Habana. Ecosolar [Internet]. 2023 [consultado: 10 de julio de 2024]; (83): 9-21. Disponible en: https://ecosolar.cubaenergia.cu/index.php/ecosolar/article/view/127/245.

20:00), cada uno de los cuales coincidió con un registro tri-horario de la estación meteorológica de Casablanca (10:00 am, 1:00 pm y 7:00 pm). En las campañas se midieron los valores de la temperatura y la humedad relativa del aire; la dirección y velocidad del viento solo se monitoreó en la mitad de los casos de estudio, y también se obtuvieron imágenes termográficas. La información recopilada se complementó con una planilla de observación que recoge el estado del tiempo, detalles sobre la vegetación y los materiales de terminación, el tráfico urbano, las personas y actividades desarrolladas. En todos los casos de estudio se mantuvo un punto de medición constante que sirvió de referencia durante las campañas.

Se emplearon *data loggers* con precisión de ±0,2 °C entre 0 y 70 °C, con resolución de 0,04 °C para la temperatura, y de ±2,5 % entre 10 % y 90 % para la humedad relativa, con un máximo de ±3,5 %, y ±5 % en valores superiores al 90 %. Aunque los fabricantes validan la calibración profesional de todos los sensores adquiridos, esto fue verificado mediante la comparación de las mediciones registradas por los sensores durante una semana en las mismas condiciones.

De cada uno de los puntos de medición identificados en los recorridos se elaboró una ficha que contiene su ubicación; la sección de vía; el ángulo de visión del cielo obtenido (incluida la vegetación) mediante la herramienta automatizada "*Sky View Analysis*" que es un *plugging* de *Sketchup*, a la cual se ha superpuesto la trayectoria solar estereográfica, así como fotos e imágenes obtenidas con la cámara termográfica.

Los resultados del monitoreo permitieron caracterizar el comportamiento del microclima térmico en los casos de estudio y arribar a una clasificación en cuatro grandes grupos de tipos morfológicos, en cada uno de los cuales, difieren las prioridades de las posibles estrategias de transformación a realizar para una mejor adaptación al calentamiento global. Los datos obtenidos también se usaron para calibrar los resultados de la simulación de algunos de los puntos monitoreados, con vistas validar la posible aplicación del software para simular el impacto de las transformaciones propuestas.

La etapa de investigación teórica no solo incluyó los parámetros e indicadores que influyen en el microclima urbano, tanto relativos a la morfología como a los modificadores de su impacto, y los métodos a seguir para el monitoreo del ambiente térmico exterior, sino también las posibles estrategias para reducir el impacto de la isla de calor urbana y lograr una mejor adaptación al calentamiento global. El análisis de las mejores prácticas a escala internacional apropiadas para el clima cálido y húmedo de La Habana condujo a resumir las cuatro estrategias fundamentales a seguir.

Para estimar y discutir el impacto de las transformaciones propuestas en el microclima urbano se tuvieron en cuenta los resultados de la investigación teórica, la información obtenida en las campañas de monitoreo y la simulación de sus efectos, mediante el software *ENVImet*, que es una herramienta fiable empleada para evaluar la relación entre la forma urbana y el cambio climático, no solo en el efecto de isla de calor sino también en la contaminación urbana [15]. Es el método más común y más ampliamente aceptado para modelar la ICU tropical, su influencia en el consumo de energía de los edificios, y el efecto de urbanizaciones compactas en el trópico.

Para calibrar el *software* se modelaron algunos de los espacios urbanos que habían sido monitoreados con vistas a comparar los resultados de la simulación con las mediciones. Posteriormente se simuló el posible comportamiento antes y después de algunas transformaciones propuestas.

[15] Bregiatto de Oliveira PdS, Astigarraga R, Borelli G, Saiz PJ, Nader G. Consequences of verticalization. Paper presented at: PLEA 2015. Proceedings of the 31nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture; 2015 Sep 9-11; Bologna, Italia. Available in: http://plea-arch.org/plea-proceedings/.

A pesar de las limitaciones derivadas del uso de la versión libre del *software*, en un proceso iterativo se fueron ajustando los valores de entrada hasta hacer coincidir la temperatura simulada con la monitoreada. Entre los datos ajustados se encuentran: las propiedades de los materiales de construcción, ya que los recomendados en la biblioteca del programa no se corresponden con los predominantes en Cuba; la temperatura del suelo, que fue ajustada a partir de investigaciones precedentes [16], porque el programa asume 20 °C, valor muy bajo para La Habana; y la velocidad del viento, para lo cual se emplearon las registradas en el monitoreo realizado de cada área.

Con respecto a la cuadrícula del modelo, a pesar de que los valores más utilizados en investigaciones previas están entre 2 m [17] y 1,5 m [18], se comparó el comportamiento de una retícula de 1,5 m con otra de 3 m, y se optó por esta última para abarcar una mayor área de estudio. Aunque en ocasiones las temperaturas simuladas pueden ser hasta 3 °C inferiores a las monitoreadas, sobre todo en la tarde, es posible usar el *software* para evaluar el impacto de las soluciones propuestas si se compara la situación de partida con la transformada, ya que ambas simulaciones se realizan sobre la misma base y los resultados que se obtienen no son absolutos, sino relativos.

Resultados y Discusión

Resultados del estudio teórico

Deng et al. [19], reconocieron en 2013 que los patrones térmicos urbanos responden a fenómenos físicos complejos que involucran diversos efectos ambientales, por lo que resulta insuficiente emplear un solo indicador para explicarlos. Los resultados obtenidos por Singh et al. en 2017 [20] al estimar la temperatura de superficie, indicaron que la distribución espacial se afecta por el cambio de ocupación y uso, así como por causas antropogénicas. La porción central de la ciudad exhibe las temperaturas más altas comparadas con las áreas abiertas circundantes, teniendo el área densa la mayor temperatura, y las cubiertas por vegetación y cuerpos de agua las más bajas.

Tsoka, S. et al. [21] evaluaron en 2017 el impacto en los parámetros micro-climáticos, tales como las temperaturas de superficie, media radiante y del aire, en diferentes escenarios de intervención, atendiendo a las características de un distrito urbano de Thesaloniki. Los escenarios incluyen el total reemplazo del pavimento de hormigón y asfalto de las calles por materiales similares fríos, el incremento de la cantidad de árboles, y la combinación de ambas acciones.

También Morille et al. [22] reconocieron en 2016 que la vegetación urbana (árboles, césped, paredes y techos verdes) puede ser una solución para mitigar el efecto de la isla de calor inducido por la densidad urbana. Para ellos las paredes verdes y los árboles son los más eficientes, sobre todo en edificios menos aislados y con más superficies vidriadas. El impacto de las áreas de césped y paredes verdes aplicadas en los barrios es más sensible cuando no hay árboles en la calle ni cubiertas verdes sobre los edificios estudiados.

[16] Collado Baldoquin N, González Couret D, Rueda Guzmán LA. Energy Retrofit of Traditional Buildings in a Warm-Humid Urbano Climate. In: Sayigh A, editor. Achieving Building Comfort by Natural Means. Luxembourg: Springer; 2022. pp. 451-483. Available in: https://doi.org/10.1007/978-3-031-04714-5.

[17] Salvati A, Kolokotroni M. Microclimate Data for Building Energy Modelling: Study On ENVI-Met Forcing Data. Paper presented at: Building Simulation Conference. Proceedings of the 16th Conference of IBPSA; 2019 Sep 2-4; Rome, Italy. pp. 3361-3368. Available in: https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210544.

[18] McRae I, Freedman F, Rivera A, Li X, Dou J, Cruz I, et al. Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. Building and Environment [Internet]. 2020 [cited: July 10, 2024]; 184: 107180. Available in: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107180.

[19] Deng C, Wu C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. Remote Sensing of Environent [Internet]. 2013 [cited: July 10, 2024]; (131): 262-274. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.020.

[20] Singh P, Kikon N, Verma P. Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. Sustainable Cities and Society [Internet]. 2017 [cited: July 10, 2024]; 32: 100-114. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018.

[21] Tsoka S, Tsikaloudaki K, Theodosiou T. Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. Energy and Buildings [Internet]. 2017 [cited: July 10, 2024]; 156: 96-108. Available in: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066.

[22] Morille B, Musy M, Malys L. Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions. Energy and Buildings [Internet]. 2016 [cited: July 10, 2024]; 114: 275-282. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.030.

Entre las estrategias y procesos de mitigación del efecto isla de calor urbana por su efecto en la evapotranspiración y absorción de CO_2, en 2015 Nuruzzaman [23] enunció: la vegetación; los árboles de sombra que interceptan la radiación solar; los techos verdes, ya que las cubiertas representan en 26 % de la superficie urbana; además de los pavimentos permeables que se enfrían por el agua infiltrada, los cuerpos de agua y la propia planificación urbana.

La importancia de los espacios verdes para mitigar la isla de calor urbana fue reconocida en 2017 por Zhang et al. [24] en Nanchang, China, al demostrar que la temperatura de las superficies se incrementó en el área de estudio en 1,64 °C entre 2000 y 2013 como consecuencia de la rápida urbanización y la pérdida de los espacios verdes, concluyendo que estos pueden ayudar a mejorar la habitabilidad total y la sustentabilidad ambiental de las ciudades. Igualmente, Perini et al. [25] afirmaron en 2014 que la vegetación en el suelo y el techo mitiga la temperatura de verano, decrece la carga de enfriamiento y mejora el bienestar térmico.

Entre las estrategias para reducir la ICU propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [26] se encuentra la necesidad de plantar árboles de sombra e instalar tejados fríos que pueden reducir las temperaturas de la superficie y del aire en las ciudades, y la cantidad de energía necesaria para enfriar los edificios.

A su vez, las estrategias propuestas en 2017 por Estrada et al. [7] para mitigar la ICU, están básicamente dirigidas al uso de techos blancos o verdes y de pavimento reflectante o claro. Según este autor, el rango de reducción máxima de la temperatura que se puede conseguir adoptando diferentes medidas se sitúa entre 1,2 °C y 3 °C, y el valor más alto de 3 °C resulta de la combinación de la expansión de la vegetación, los pavimentos y los tejados fríos. Se calcula que la creación de tejados verdes en el 50 % de las superficies disponibles reduce la temperatura del aire en toda la ciudad entre 0,1 °C y 0,8 °C y que se puede conseguir una disminución adicional de entre 0,5 °C y 1,0 °C mediante el riego.

Williams en 2021 [27] definió varias formas de reducir el efecto de isla de calor urbana. En el informe realizado en 2021 por Ijjasz-Vasquez et al. [10] se afirma que un edificio a la sombra de los árboles tiene menores costos de aire acondicionado, lo que también reduce tanto el calor directo como las emisiones de carbono, y recomiendan el empleo de estructuras de sombra como elementos de protección solar, arcadas, columnatas, pérgolas y toldos. Según estos autores, los techos y muros verdes aíslan los edificios del calor y enfrían el aire a través de la evapotranspiración, y pintar los techos de blanco reduce el calor al aumentar la reflectividad. Sin embargo, el empleo de colores claros en las calles afecta la sensación térmica de los peatones [28].

Jamei et al. [29] plantearon en 2016 que los planificadores y diseñadores urbanos deben hacer ciudades con el menor nivel de vulnerabilidad al cambio climático futuro, para lo cual deben desarrollar estrategias de mitigación y adaptación que consideren la geometría urbana (sección de vía, orientación de las calles y factor de visión del cielo) y la vegetación en los niveles peatonales. Para estos autores, la distribución y arreglo de los edificios en una ciudad afectan la formación de la isla de calor y el confort térmico, ya que definen el nivel de exposición al sol y la intensidad del flujo de viento; sin embargo, los árboles en la calle y los parques enfrían el ambiente, por lo que la correcta selección de la vegetación, tipo, forma y densidad, produce un efecto positivo.

[23] Nuruzzaman Md. Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis [Internet]. 2015 [cited: July 10, 2024]; 3(2): 67-73. Available in: https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15

[24] Zhang X, Estoque RC, Murayama Y. An urban heat island study in Nanchang City, China based on land surface temperature and social-ecological variables. Sustainable Cities and Society [Internet]. 2017 [cited: July 10, 2024]; 32: 557-568. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.005.

[25] Perini K, Magliocco A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening [Internet]. 2014 [cited: July 10, 2024]; 13(3): 495-506. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003.

[26] United States Environment Protection Agency. USA: US EPA. Climate Change and Heat Islands; february 16, 2022 [cited: July 10, 2024]. Available in: https://www.epa.gov/heatislands/climate-change-and-heat-islands.

[27] Williams J. 7 ways to reduce the urban heat island effect. The Earthbound Report. WordPress.com; july 14, 2021 [cited: July 10, 2024]. Available in: https://earthbound.report/2021/07/14/5-ways-to-reduce-the-urban-heat-island-effect/.

[28] Bloch S. The Problem With 'Cool Pavements': They Make People Hot. Bloomberg US Edition; October 3, 2019 [cited: July 10, 2024]. Available in: https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-10-03/reflective-pavement-may-be-less-cool-than-it-seems.

[29] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M, Jamei Y. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Internet]. 2016 [cited: July 10, 2024]; 54 (2016) 1002-1017. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104.

Según Bassi et al. [30], es posible encontrar en la literatura tres términos similares: "infraestructura natural", "infraestructura basada en naturaleza" e "infraestructura verde". La primera incluye componentes naturales y antropogénicos: "*green*", como los humedales y "*green-grey*", entre los que se encuentran pavimentos permeables y espacios verdes en áreas urbanas. La segunda contempla ecosistemas naturales, por ejemplo, bosques, manglares, humedales y praderas, pero también estructuras de ingeniería o "grises" (jardines de lluvia y tejados verdes) [30].

También los espacios azules-verdes han sido reconocidos por Zhou et al. [11] como estrategias efectivas para mitigar el efecto de la isla de calor urbana, cuando investigaron en 2022 los tipos de ocupación y uso del suelo, y el efecto del tamaño, forma y porcentaje del espacio verde en la temperatura de superficie y el enfriamiento urbano en diferentes barrios. Kinnunen et al. [12], por su parte, se refieren a los impactos climáticos beneficiosos atribuibles a los residentes, tal como el secuestro y almacenamiento de carbono promovido por las viviendas y espacios verdes residenciales.

Entre todas las estrategias de mitigación, la vegetación parece ser la medida más eficaz para hacer frente al efecto de la ICU, mientras que el uso de pavimentos de alto albedo tiene numerosas limitaciones [24]. La vegetación es una variable de suma importancia, como elemento natural, renovable, ideal sumidero de CO_2 y mecanismo de enfriamiento con mínimo costo [31], que en investigaciones precedentes de los autores de este artículo ha sido enfocada como modificador de la geometría urbana, ya que puede estar presente o no en cualquier morfología [32].

Sin embargo, el efecto generado por la vegetación en la temperatura urbana nocturna ha sido notado por varios autores consultados para la elaboración del marco teórico [33], y las consecuencias de este efecto en el ambiente térmico interior y el bienestar nocturno de las personas deben ser profundizadas en futuras investigaciones.

El análisis de las mejores prácticas a escala internacional apropiadas para el clima cálido y húmedo de La Habana condujo a resumirlas en cuatro estrategias fundamentales, encaminadas a: la reducción de la exposición al sol de los pavimentos, fachadas y cubiertas; la pacificación del tránsito vehicular; la disminución de la absortividad, emisividad e inercia térmica de los materiales de construcción y terminación superficial, y el incremento de la vegetación. Pero esta última estrategia está directamente relacionada con todas las demás, pues la sombra de los árboles es una vía para reducir la exposición al sol; la pacificación del tránsito vehicular puede lograrse con la reducción de la franja de rodamiento de las calles y su sustitución por espacios verdes, y la mejora en el comportamiento térmico de los materiales de construcción y terminación puede también obtenerse mediante el empleo de pavimentos, fachadas y cubiertas verdes (Tabla 1).

Por tanto, el incremento de la vegetación es, sin dudas, la principal estrategia para reducir el impacto de la isla de calor y adaptarse al calentamiento global en áreas urbanas de regiones cálidas y húmedas como La Habana, con independencia de que la importancia de esta estrategia varíe en cada tipo morfológico urbano de acuerdo con los parámetros que lo caracterizan.

[30] Bassi AM, Pallaske G, Wuennenberg L, Graces L, Silber L. Sustainable Asset Valuation Tool: Natural Infrastructure. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development; 2019. Available in: https://www.iisd.org/system/files/publications/sustainable-asset-valuation-tool-natural-infrastructure.pdf.

[31] Bechauf R, Cutler E, Bassi A, Casier L, Kapetanakis M, Pallaske G, et al. The Value of Incorporating Nature in Urban Infrastructure Planning. IISD Report. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development; 2022. Available in: https://nbi.iisd.org/report/nature-in-urban-infrastructure-planning/.

[32] González Couret D, Sánchez Martínez O. Towards a more resilient urban morphology in Havana. Paper presented at: PLEA 2016. Proceedings of the 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture; 2016 Jul 11-13; Los Angeles, USA. Los Angeles: Pomona University; 2016. Available in: http://www.plea-arch.org/index.php/plea-proceedings/.

[33] Yin S, Wang F, Xiao Y, Xue S. Comparing cooling efficiency of shading strategies for pedestrian thermal comfort in street canyons of traditional shophouse neighbourhoods in Guangzhou, China. Urban Climate [Internet]. 2022 [cited: July 10, 2024]; 43(2): 101165. Available in: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101165.

Tabla 1. Estrategias de diseño más recomendables según parámetros morfológicos.

PARÁMETROS	INDICADORES	ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN												
		Reducir la exposición al sol			Reducir el tránsito vehicular			Reducir la absortividad, emisividad e inercia térmica de los materiales de construcción y terminación					Incrementar la vegetación	
		Pavimentos	Fachadas	Cubiertas	Reducción de la franja vehicular	Trazado sinuoso de la vía	Facilitar la circulación segura de ciclos y peatones	Reducción de la superficie de asfalto	Pavimento frío y poroso	Pavimento verde	Evitar superficies blancas y altamente reflectantes	Evitar superficies de colores oscuros	Césped	Árboles
Altura de los edificios	5 plantas													
	4 plantas													
	2 plantas													
Diferencia de altura de los edificios	4 plantas													
	2 plantas													
	0 plantas													
Distancia entre fachadas	25 m													
	20 m													
	15 m													
	9 m													
	6 m													
Jardín	Mixto													
	No jardín													
	Jardín													
Tipología arquitectónica	Típico													
	Autoconstruido													
	Moderno													
	Histórico													

Recomendable
Muy recomendable
Imprescindible

Fuente: Elaboración propia.

Resultados del diagnóstico

Según los resultados de la primera campaña de monitoreo realizada en mayo, las menores temperaturas en los puntos fijos tomados como referencia se presentan en las urbanizaciones con mayor presencia de vegetación, como El Vedado. Sin embargo, los menores registros se producen durante el día, pero en la madrugada las temperaturas son casi iguales, o incluso, ligeramente mayores que en La Habana Vieja y Marianao, ambas zonas urbanas compactas sin vegetación. Esto permite verificar que el efecto de la vegetación dificulta la rápida emisión nocturna a la bóveda celeste del calor ganado por la masa construida durante el día.

Por el contrario, las mayores temperaturas diurnas se producen en las urbanizaciones compactas sin vegetación, como Marianao, La Habana Vieja o Centro Habana. En esta última, con mayor altura de los edificios, se presentan los valores nocturnos más elevados, que pueden llegar a 28 °C, como consecuencia de la inercia térmica.

Las temperaturas son también muy altas al mediodía en las zonas urbanas Abiertas, como Alamar, donde la vegetación presente no es suficiente para contrarrestar el amplio ángulo de visión del cielo, lo que genera un fuerte calentamiento diurno y un rápido enfriamiento nocturno, razón por la cual las temperaturas son relativamente bajas en la noche.

Durante la segunda etapa de monitoreo, en las campañas correspondientes a los meses de junio y julio, la urbanización Compacta de Luyanó presenta las temperaturas más altas en el horario de la mañana y la noche, como consecuencia de la inercia térmica de la masa construida, mientras que no es el tipo más caluroso después del mediodía, debido al menor ángulo de visión del cielo con respecto a las Semi-compactas, como La Lisa, Buena Vista, Atabey y Flores o Abiertas como Guiteras, y por tanto, inferior exposición a la radiación solar según la sección de vía con ancho de 9 m.

Por el contrario, las más altas temperaturas al mediodía se producen en las urbanizaciones Abiertas como el reparto Guiteras, o Semi-compactas de muy baja ocupación del suelo, como Atabey (COS 0,31), ya que el mayor ángulo de visión del cielo permite una incidencia superior de la radiación solar más perpendicular a esa hora, a pesar de la presencia de vegetación.

Aunque las temperaturas monitoreadas más bajas se presentan en la tarde – noche, como era de esperar, aún resultan altas (por encima de 32 °C) en los tipos urbanos Compacto y Semicompacto. Solo en la urbanización Abierta, la baja inercia térmica de la masa construida no genera tan altas temperaturas nocturnas.

Los valores más bajos en los tres horarios monitoreados se producen en el reparto Flores (siempre por debajo de 34 °C), a pesar de que presenta condiciones morfológicas similares a Atabey y Guiteras en cuanto al bajo coeficiente de ocupación del suelo (0,22), la gran separación entre edificios (entre 5 y 6 m), por el ancho de las vías (32 m), y la presencia de vegetación (aproximadamente 70 % de área verde). Pero la diferencia fundamental radica en la orientación como parámetro modificador del impacto de la morfología. Prácticamente todas las calles del reparto Flores que conforman sus manzanas largas y estrechas, están orientadas casi en el eje Norte – Sur, por lo cual reciben la radiación solar fundamentalmente al mediodía; mientras que en Atabey, aunque el trazado es ligeramente curvo, las vías están orientadas en un ángulo cercano a 45 grados con respecto al eje Norte – Sur, de manera que la mayoría de las calles se desarrollan en el sentido SO-NE.

En esta comparación general del microclima térmico en los diferentes tipos morfológicos queda demostrada la influencia de la compacidad que genera altas temperaturas durante el día y la noche en las morfologías Compactas, mientras que las urbanizaciones Abiertas o Semi-compactas con baja ocupación del suelo resultan peores al mediodía. También se constata que las vías cuyo eje se orienta en un entorno cercano a la dirección N-S resultan más favorables desde el punto de vista térmico. Por tanto, se verifica la validez de los criterios inicialmente asumidos para la evaluación cualitativa de los tipos morfológicos identificados.

Se comprueba la influencia de la orientación de las vías en la temperatura del aire exterior, aunque este impacto se reduce en las zonas compactas, donde el ángulo de visión del cielo es menor. También se verificó la influencia del arbolado viario. En futuras investigaciones será necesario precisar el impacto que esto puede tener en el bienestar de las personas en espacios interiores durante las horas de sueño en climas cálido – húmedos, como en el caso de La Habana.

Las imágenes tomadas con la cámara termográfica ofrecen las temperaturas superficiales que dependen de la exposición a la radiación solar y de las características físico - térmicas de los materiales de terminación. En los cierres verticales suelen ser mayores de 35 °C, superando los 40°C cuando están expuestas al sol, y llegan a más de 50 °C cuando se trata de terminaciones de color claro o materiales muy reflectantes. La sombra de la vegetación puede reducir en 5 °C la temperatura de los cierres verticales y en 10 °C la de las superficies horizontales, como el asfalto de las vías, usualmente superior a 40 °C. Por último, las superficies verticales oscuras, altamente absorbentes, así como las muy claras, reflectantes o metálicas, pueden alcanzar temperaturas superficiales superiores a 50 °C (Figura 2).

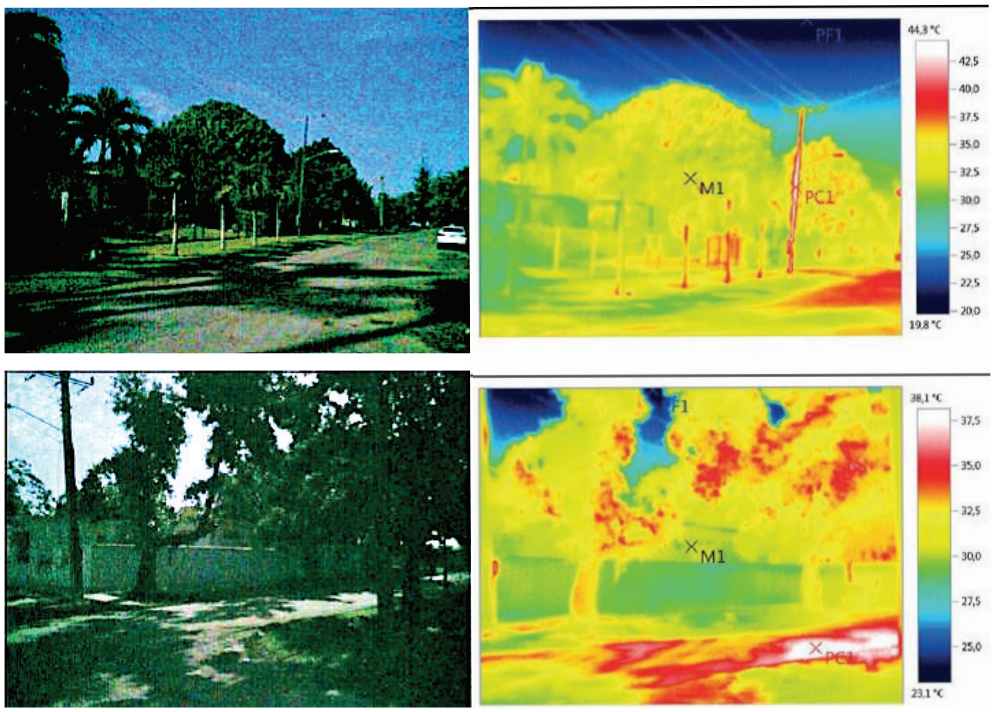

Figura 2. Imágenes tomadas con la cámara termográfica en el Reparto Flores. Fuente: Autores.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el monitoreo de la temperatura del aire exterior en diferentes tipos morfológicos se consideró necesario subdividir el tipo Semi-compacto en dos grandes grupos según el ancho de vía y el Coeficiente de Ocupación del Suelo (COS) que determinan la exposición de las superficies al sol y por tanto, las máximas temperaturas diurnas. En este tipo, las urbanizaciones con ancho de vía entre 6 y 15 m y COS medio de 0,60 se diferencian de aquellas donde las calles son más anchas que 20 m y el COS es bajo (0,40 y menos) (Figura 3).

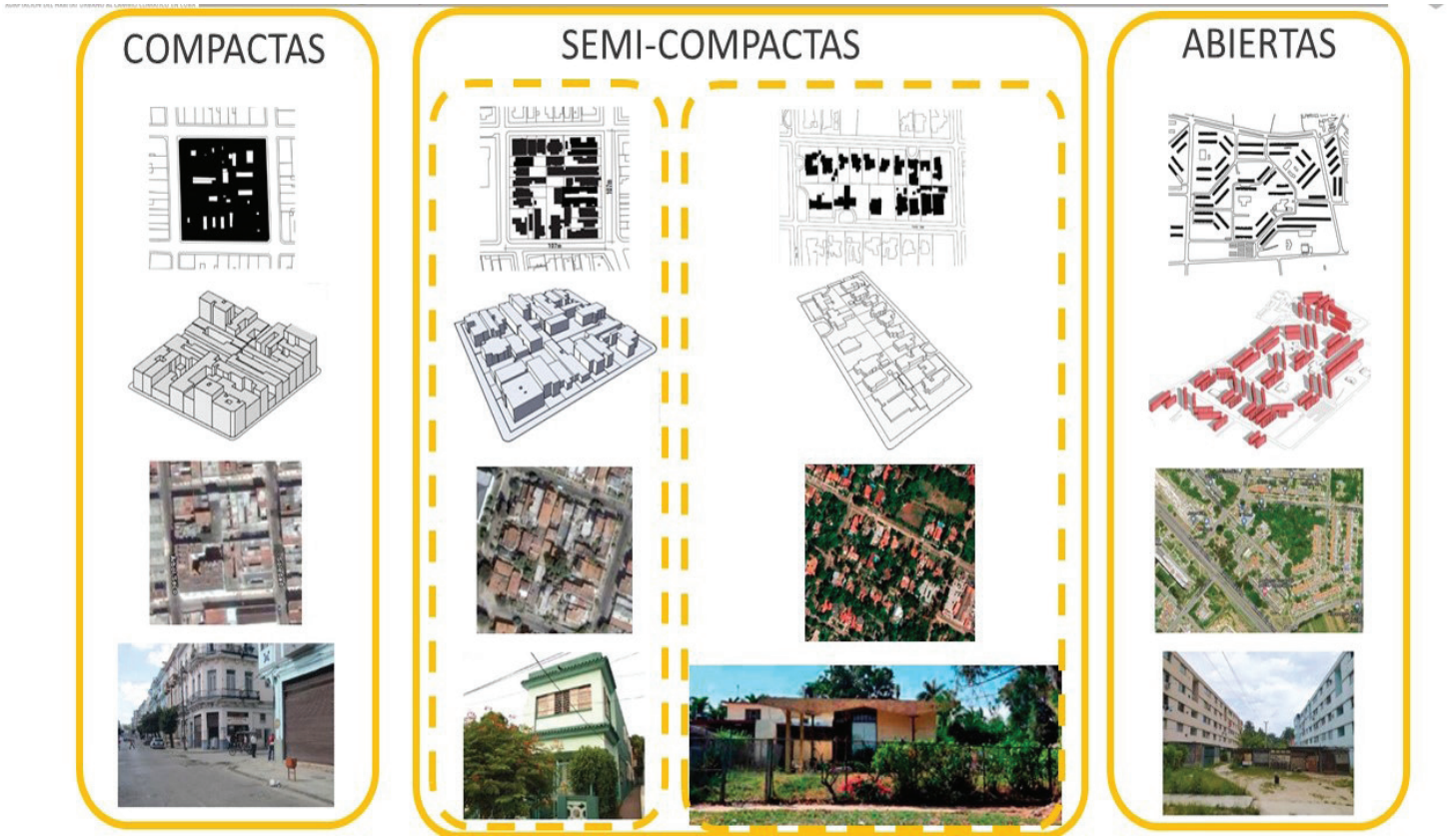

Figura 3. Clasificación y agrupación de tipos morfológicos según comportamiento del microclima térmico. Fuente: Elaboración propia.

Propuestas de transformación

De los resultados del diagnóstico del microclima y su relación con la morfología urbana se han derivado las estrategias de diseño y transformación propuestas, cuyas prioridades difieren según las características del tipo morfológico.

En los tipos morfológicos Compactos, las mayores temperaturas se producen en la mañana y la tarde, como consecuencia de la inercia térmica de la masa edificada. Por tanto, lo más importante no es proteger del sol alto del mediodía que incide menos en las áreas pavimentadas por el más reducido ángulo de visión del cielo, sino evitar el calentamiento diurno de la masa edificada por todas las vías posibles.

Aunque estas zonas se caracterizan por la ausencia de vegetación y su presencia no es imprescindible para mejorar el microclima urbano, el verde trae tantos otros beneficios, que siempre que sea posible, su uso será bienvenido. Esto puede lograrse en la vía, para ordenar, delimitar y proteger espacios, mediante coberturas, pequeños árboles o arbustos, macetas u otro tipo de contenedores, y pavimentos verdes de diversos tipos y adecuados al uso; en las fachadas de los edificios, por ejemplo, mediante contenedores en balcones, y en forma de cubierta doble con espacio transitable debajo, en lugar del techo verde intensivo o extensivo.

Por las características de la sección de vía en este tipo morfológico, donde predomina la altura de los edificios sobre el ancho de la calle, es prioridad arrojar sombra sobre las fachadas, de acuerdo con su orientación. Aunque ha quedado demostrado que las vías con el eje orientado en el entorno N-S reciben menos radiación solar por lo que las temperaturas en ellas son menores, las fachadas de los edificios a ambos lados de la vía quedan orientados al Este y al Oeste, de manera que deberán protegerse de la radiación solar directa como complemento de la sombra arrojada por el contexto. Por tanto, la protección no solo dependerá de la orientación y de la altura de los edificios vecinos, sino que variará en cada piso, ya que el requerimiento es mayor en los pisos superiores.

Son numerosos los recursos de diseño a emplear para arrojar sombra sobre las fachadas, según el contexto, la orientación, el edificio, su uso y los valores a proteger, todo lo cual deberá tenerse en cuenta en el diseño de la envolvente de un nuevo edificio o al añadir elementos a uno existente. En cualquier caso, los horizontales son

recomendables en las fachadas con orientación sur, y también al norte, aunque con menores dimensiones. Pueden emplearse aleros y balcones colgados, elementos horizontales múltiples, toldos y marquesinas, y, por supuesto, también vegetación adaptada a estos requerimientos de protección (Figura 4).

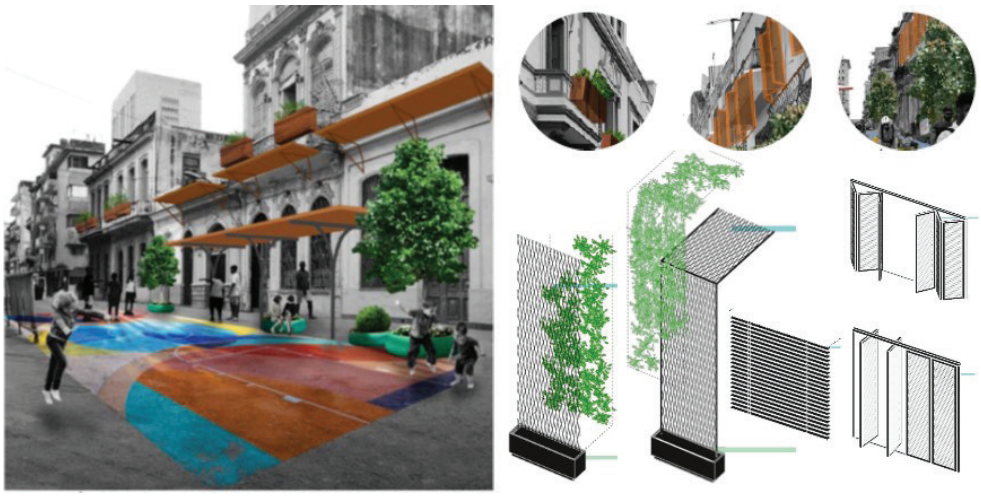

Figura 4. Posibles transformaciones en los tipos urbanos compactos. Fuente: Elaborado por Thalía Pérez, Katherine Álvarez y Talía Hurtado de Mendoza.

En la morfología Semi-compacta se reconocen dos tipos: a) los que tienen una ocupación del suelo media, de aproximadamente 0,60, con ancho de vía entre 9 y 15 m, y manzanas de dimensiones también medias (60 m), en muchos casos rectangulares, como los que abundan en la mayoría de las ciudades cubanas, b) los que presentan un bajo coeficiente de ocupación del suelo (inferior a 0,40), con vías anchas de 20 m y más, manzanas y lotes de mayores dimensiones, y abundancia de vegetación.

El primero tiene un desempeño microclimático intermedio, cuya variación depende del comportamiento particular de los patrones morfológicos, como la altura de las edificaciones y su variedad, la tipología arquitectónica, y otros modificadores como la mayor o menor presencia de vegetación en parterres y jardines, y la orientación.

En el segundo, a pesar de que, por lo general, la presencia de vegetación es abundante, el excesivo e innecesario ancho de las vías, por las cuales el tránsito vehicular suele ser escaso, conjuntamente con las extensas superficies de cubiertas expuestas al sol en las edificaciones de baja altura, generan elevadas temperaturas diurnas, sobre todo en el horario del mediodía. Por tanto, las acciones de diseño y transformación para una mejor adaptación al calentamiento global difieren en cada caso.

En el tipo Semi-compacto de COS medio se recomienda recuperar jardines y parterres en caso de que hayan existido y hubiesen sido posteriormente eliminados o pavimentados (Figura 5). Esto puede ser una acción progresiva, con participación popular. Una etapa intermedia podrá ejecutarse con macetas u otros contenedores de vegetación, preferiblemente producidos con materiales reusados o reciclados, para ubicar en los espacios de jardines y parterres que se desea rescatar. En la medida de lo posible, conviene recuperar también los portales, balcones y terrazas que hayan sido cerrados previamente.

Figura 5. Posibles transformaciones en los tipos urbanos Semi-compactos de COS medio. Fuente: Elaborado por Talía Hurtado de Mendoza.

Las viviendas ejecutadas en los últimos setenta años por lo general poseen pequeños aleros que son insuficientes para la protección solar, por lo que deben ser complementados mediante otros elementos como pretiles, pantallas, celosías, pérgolas, toldos, tramas múltiples y otros, según las particularidades, posibilidades y el gusto de cada cual. Siempre que sea posible se deberá intentar proteger la cubierta expuesta, con elementos dobles, que pueden ser verdes o fotovoltaicos.

El tipo Semi-compacto de bajo COS, por lo general se trata de urbanizaciones que originalmente pertenecieron a estratos sociales medios y altos, en la periferia urbana, como zonas residenciales sin servicios y conectadas con el resto de la ciudad mediante el uso del automóvil, de manera que cada vivienda tiene su propio *carport* o garaje para uno o dos vehículos, y se encuentran aisladas en medio de un gran lote bordeado por jardines y hoy por cercas que constituyen límites más o menos permeables para mantener la privacidad de la vivienda con respecto al entorno. Las edificaciones suelen ser de gran tamaño, de una o dos plantas, es abundante la vegetación en jardines, patios, parterres y las vías son amplias, por lo cual, a pesar de la vegetación existente, reciben gran cantidad de radiación solar. Por lo general, el espacio público se usa solo para circular, preferiblemente a pie, por las calles donde no circula el transporte público, los automóviles de los habitantes son cada vez más escasos, y no hay intercambio ni vida comunitaria. De lo que se trata en este caso es de hacer todo lo posible por reducir la radiación solar que se recibe en las vías innecesariamente anchas, y que provoca elevadas temperaturas, principalmente, en horas del mediodía, y de arrojar sombra sobre las amplias cubiertas expuestas al sol en las viviendas de baja altura.

Por tanto, las acciones y soluciones de diseño recomendadas para la transformación en este caso consisten en reducir el área pavimentada de las vías al mínimo indispensable, empleando materiales diferentes del asfalto, con menor capacidad térmica, pues el rodamiento por ellas es escaso; sustituir con césped la mayor cantidad de espacio posible, y mantener sendas claras, bien dimensionadas y de tránsito fácil para los ciclos y los peatones, con protección mutua y sombreados (Figura 6).

Figura 6. Posibles transformaciones en los tipos urbanos Semi – compactos de bajo COS. Reducción de la franja vial asfaltada. Fuente: Elaborado por Rafael Díaz.

Por lo general las viviendas existentes en estas urbanizaciones siguen los códigos modernos, de manera que poseen portales, aleros, terrazas, y grandes ventanales con soluciones abrideras, poco vidrio y protegidas. Es por ello que la principal acción a acometer debe ir dirigida a aumentar la sombra arrojada sobre las cubiertas, lo cual puede lograrse mediante árboles, por tratarse de edificaciones de baja altura. No obstante, en este tipo urbano se recomienda sombrear las cubiertas expuestas a la radiación solar, preferiblemente mediante el empleo de dobles cubiertas verdes, que, además, tengan fines productivos, o fotovoltaicas, que contribuyan a la generación energética y proporcionen un espacio transitable sombreado bajo ellas. Esto puede lograrse con el uso de estructuras ligeras conformadas mediante elementos múltiples reticulares permeables al sol y al viento. (Figura 7). También se recomienda hacer más permeables los muros y tapias que delimitan el espacio público del privado, en caso de que se hayan violado las regulaciones urbanas.

Figura 7. Posibles transformaciones en los tipos urbanos Semi – compactos de bajo COS. Doble cubierta. Fuente: Elaborado por Carlos Raúl Salgado.

El tipo de urbanización abierta sigue los preceptos del urbanismo moderno, por lo cual repite el mismo proyecto de edificio tipo bloque en diferentes posiciones y formas de asociación, sin la presencia de la tradicional red vial ni el ordenamiento que proporciona la lotificación. Por tanto, responde a una lógica diferente de los casos anteriores, a lo cual se suman las transformaciones operadas por la comunidad y las personas de manera individual como consecuencia de la falta de control urbano. Entre los principales problemas de estas urbanizaciones se encuentran el desorden visual del espacio exterior, el bajo aprovechamiento del suelo, la falta de delimitación del espacio público y privado, cuyo mantenimiento y conservación queda, por tanto, en manos de nadie.

Desde el punto de vista del microclima térmico urbano, que es el objeto de estudio de este trabajo, el monitoreo realizado arroja elevadas temperaturas diurnas, fundamentalmente al mediodía. Esto es consecuencia de diversos factores, entre ellos, la falta de vegetación en los espacios comunes abiertos, así como elementos construidos que se han ido adicionando aledaños a los edificios de vivienda, los cuales reducen, obstruyen y desordenan el espacio público, reciben, reflejan y emiten radiación, y obstruyen la iluminación natural y ventilación hacia los espacios interiores en planta baja.

Por otro lado, en estas urbanizaciones no se concibió espacio de garaje, de manera que los habitantes de las viviendas los han ido improvisando, y a diferencia de la ciudad tradicional, no todos los edificios tienen la garantía de un acceso vehicular directo. Sin embargo, a pesar de que se trata de urbanizaciones desarrolladas hace apenas cincuenta años, hoy ocupan un área mayoritaria de La Habana y otras ciudades del país, con un muy bajo aprovechamiento del suelo y densidad.

El primer objetivo es contribuir a reducir las elevadas temperaturas que se producen al mediodía por la incidencia de la radiación solar en los

grandes espacios vacíos y desprotegidos del sol. Para ello es necesario reducir al máximo las áreas pavimentadas en los espacios exteriores e incrementar la vegetación, tanto cobertura como arbórea. Resulta necesario arrojar sombra en las extensas superficies exteriores pavimentadas para estacionamiento que deban permanecer. Esto puede lograrse mediante árboles u otras estructuras ligeras, incluyendo cubiertas fotovoltaicas. También se recomienda asignar el espacio de frente y fondo para el uso de la vivienda en planta baja.

Para contribuir al logro de un mejor ambiente térmico sería necesario, además, incrementar la protección solar de la envolvente exterior de los edificios, muy expuesta al sol por la gran separación entre ellos, mediante toldos, marquesinas, elementos múltiples de protección y dobles pieles, finas o móviles, e incluso, verdes. Esto puede contribuir romper la monotonía que caracteriza a estas urbanizaciones de edificios repetitivos. Es muy aconsejable el rescate de balcones que hayan sido previamente cerrados. (Figura 8)

Figura 8. Posibles transformaciones en los tipos urbanos Abiertos. Fuente: Elaborado por Víctor Rodríguez y Manuel Salazar.

Simulación del impacto de las transformaciones

De acuerdo con los resultados de la simulación de la situación de partida y transformada en espacios seleccionados como parte de los tipos morfológicos objeto de estudio, donde las principales soluciones propuestas se basan en el uso de la vegetación según sus diferentes alternativas, ha sido posible demostrar que todos los casos logran una reducción de la temperatura del aire en las vías que oscila entre 2 °C y 4 °C al mediodía, con disminuciones aún mayores de la temperatura radiante, que pueden llegar a 20 °C a la misma hora.

Sin embargo, este proceso se invierte durante la madrugada como consecuencia de la reducción del calor emitido a la atmósfera por la presencia de la vegetación. Así, durante ese horario, la temperatura del aire puede ser superior en la situación transformada con respecto a la de partida, entre 1 °C y 5 °C, y la temperatura radiante más elevada, entre 4 °C y 12 °C (Figura 9). Es por ello que en futuros trabajos será necesario continuar investigando las consecuencias que este efecto puede ocasionar en el confort térmico y el consumo de energía nocturno en los espacios interiores.

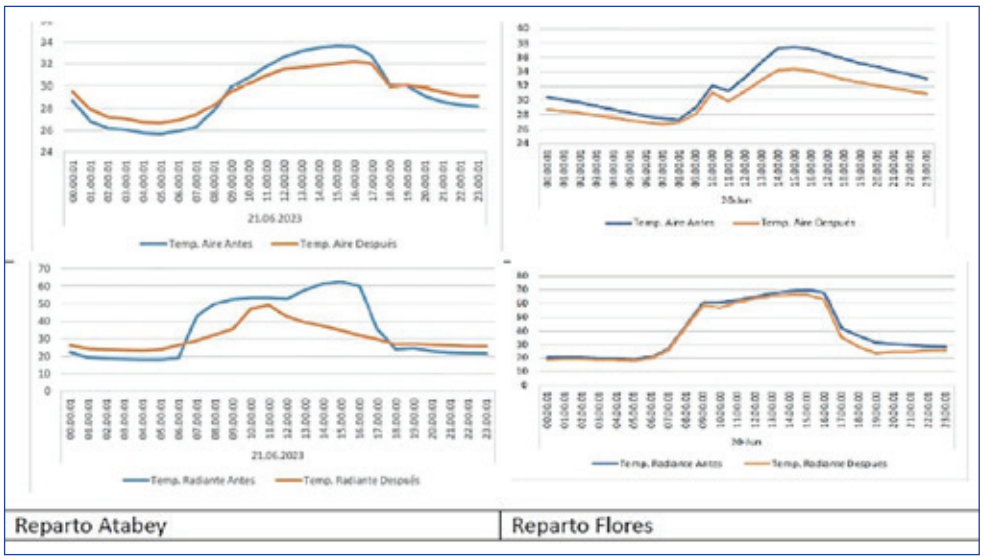

Figura 9. Temperatura del aire y temperatura radiante simulada en sitios monitoreados, antes y después de la transformación. Fuente: Elaborado por: Rafael Díaz y Carlos Salgado.

Conclusiones

Según las mejores prácticas internacionales, las principales estrategias de transformación para una mejor adaptación del hábitat urbano al calentamiento global en clima cálido – húmedo son la reducción de la exposición de las superficies al sol; la pacificación del tránsito vehicular; la disminución de la absortividad, emisividad e inercia térmica de los materiales de construcción y terminación superficial, y el incremento de la vegetación, que es transversal a las tres anteriores.

La investigación empírica realizada en 12 casos de estudio permitió clasificar los tipos morfológicos urbanos en cuatro grupos según su comportamiento térmico: Compactos con altas temperaturas e inercia térmica; Semi-compactos de COS medio, con mayores temperaturas en la mañana y la noche; Semi-compactos de COS bajo, con temperaturas más altas al mediodía, y Abiertos, con mayores temperaturas diurnas y menores en la noche.

Las acciones de transformación prioritarias para una mejor adaptación al calentamiento global difieren para los cuatro grupos de tipos morfológicos: en el Compacto debe priorizarse la incorporación de vegetación y la protección solar de fachadas; en el Semi-compacto de COS medio conviene rescatar parterres, jardines y portales; en el Semi-compacto de COS bajo se recomienda reducir la franja asfáltica de las vías innecesariamente anchas, sombrear las cubiertas y hacer más permeables las cercas perimetrales, y en el Abierto, se debe reducir al máximo posible las áreas pavimentadas, aumentar el verde urbano y la protección solar de las paredes exteriores de los edificios.

Se comprueba, tanto en el monitoreo como en la simulación, que el efecto positivo de la vegetación se reduce o se invierte en la noche, aunque en mucha menor medida que el de disminución de las temperaturas diurnas.

En futuras investigaciones será conveniente evaluar el impacto de la vegetación en el consumo de energía y el bienestar nocturno en el clima cálido y húmedo de Cuba, donde las temperaturas son también relativamente altas en la noche durante todo el año. También se deberá verificar el impacto de cada una de las transformaciones propuestas como base para un análisis costo – beneficio.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el Programa Nacional de Ciencia y Técnica "Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en Cuba".

Los autores desean agradecer la colaboración de los estudiantes (ya hoy arquitectos): Víctor Rodríguez, Manuel Salazar, Roksanda Campos, Lenier Díaz, Ronald García, Leonardo Díaz, Katherine Álvarez, Rafael Díaz, Thalía Pérez, Carlos Salgado, Paola Capaz y Talía García y Talía Hurtado de Mendoza.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que representen riesgos para la publicación del artículo.

DECLARACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

Dania González-Couret: Conceptualización; curación de datos; adquisición de fondos; investigación; metodología; administración del proyecto; supervisión; validación; redacción, revisión y edición del manuscrito.

Natalí Collado-Baldoquin: Curación de datos; investigación; validación; redacción, revisión y edición del manuscrito.

Dayra Gelabert-Abreu: Investigación; redacción, revisión y edición del manuscrito.

Lázaro Yerandy Morales-Camacho: Curación de datos; investigación; revisión y edición del manuscrito.

Luis Alberto Rueda-Guzmán. Investigación; revisión y edición del manuscrito.

Dania González Couret
Arquitecta. Doctora en Ciencias. Profesora Titular Emérito, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.
Email: daniagcouret@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1406-4588

Natalí Collado-Baldoquin
Arquitecta. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Auxiliar, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.
Email: colladobaldoquin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4248-9708

Dayra Gelabert-Abreu
Arquitecta. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Auxiliar, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.
Email: dayragelabert@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-7765-7217

Lázaro Yerandy Morales-Camacho
Arquitecto. Profesor Asistente. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.
Email: lyerandymc@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5752-7696

Luis Alberto Rueda-Guzmán
Arquitecto. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.
Email: ruedaguz72@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6549-3975

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)