

Relación entre la intensidad de uso de energía y la morfología urbana: densificación como estrategia de mitigación del cambio climático

Relationship between energy performance of buildings and urban morphology: Densification as a climate change mitigation strategy

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.194>

FÁTIMA ANAHÍ CÓRDOVA BORBÓN

Universidad de Sonora, México / ORCID: 0000-0002-5554-377X.

Correo electrónico: fatima.cordova@unison.mx

MARÍA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ

Universidad de Sonora, México / ORCID: 0000-0002-7641-0538.

Correo electrónico: guadalupe.alpuche@unison.mx

Recibido: 01 de septiembre 2021. Aceptado: 28 de febrero de 2022.

RESUMEN

Actualmente, más de la mitad de la población mundial habita en ciudades (Naciones Unidas, 2021), y se espera un incremento del uso de energía en los servicios de vivienda. Además, las ciudades se caracterizan por un crecimiento disperso, por lo que, como medida correctiva, la estrategia de densificación urbana es introducida en la planeación de las ciudades. Esta investigación tiene por objetivo analizar el impacto de la misma en la intensidad de uso de energía (IUE) de las viviendas del clima cálido seco y su relación con los parámetros de densidad. Con el fin de fundamentar la viabilidad y mejorar las herramientas de análisis y toma de decisiones para el diseño de ciudades con mayor resiliencia.

En particular evalúa el uso de aire acondicionado y calefacción a través de la selección de una muestra de análisis en Hermosillo, Sonora, de la cual se generan escenarios hipotéticos densifi-

cados que se analizan a través de la herramienta de cálculo EnergyPlus. Finalmente, los resultados muestran los parámetros morfológicos con mayor relación con el consumo e indican que la estrategia puede reducir hasta en 37% la IUE. Cabe mencionar que la definición de los escenarios representa sólo una pequeñísima fracción de la casi infinita combinación de parámetros (geometría, clima, etc.) y se limita al estudio de un solo caso.

La investigación tiene un aporte en el diseño de estrategias de crecimiento de las ciudades, en especial las de clima cálido seco. Además de evaluar niveles de densificación y establecer parámetros de análisis a través de una metodología experimental.

Palabras clave: crecimiento disperso, densificación urbana, clima cálido-seco, morfología urbana, forma urbana, intensidad de uso de energía, planeación energética.

ABSTRACT

Currently, more than half of the world population live in cities (United Nations, 2021), and an increase in energy use in housing services is expected. Furthermore, cities are characterized by dispersed growth (urban sprawl), therefore, as a corrective measure the urban densification strategy is introduced by city planners. The objective of this research is to analyze the impact of this strategy on Energy Use Intensity (EUI) of homes in the arid climate and its relationship with density parameters to substantiate the viability and improve the analysis and decision-making tools for the design of resilient cities.

This study evaluates the use of air conditioning and heating through the selection of an urban analysis sample in Hermosillo, Sonora, from which densified hypothetical scenarios are generated and simulated through Energy Plus calculation tool. Finally, the results show the morphological parameters most closely related to consumption and indicate that the strategy can reduce EUI by up to 37%. It is worth mentioning that the definition of the scenarios represents only a very small fraction of the almost infinite combination of parameters (geometry, climate, etc.) and is limited to the study of a single case.

The research has a contribution in the development of city planning strategies, especially for those with an arid climate. In addition, also evaluates different levels of densification using common parameters and validates through an experimental methodology.

Keywords: urban sprawl, urban densification, hot-arid climate, urban morphology, urban form, energy use intensity.

INTRODUCCIÓN

Actualmente más de la mitad de las personas del mundo viven en ciudades y se espera un aumento para el año 2030 de un 60%. Éstas producen aproximadamente el 60% del PIB mundial, pero a la vez son las responsables del 75% de las emisiones de carbono y entre el 60 y 80% del consumo

de energía a nivel global (Naciones Unidas, 2021). Bajo estas premisas, los entornos urbanos se convierten en el punto clave para ejecutar medidas de acción de gran impacto en la mitigación del cambio climático en la búsqueda de lograr ciudades de mayor inclusión, seguras, resilientes y sostenibles.

La preocupación y crítica sobre el crecimiento de la ciudad del siglo XX trajo consigo la inclusión del concepto de densidad dentro del estudio. En su forma de concepto más simple, la densidad es el número de unidades en un área determinada y puede ser calculada como la proporción entre la cantidad o número de unidades de una magnitud genérica y un ámbito espacial de referencia (Batty, 2009). Mientras que en el entorno urbano el concepto de densidad es utilizado para expresar la relación cierta área de tierra y alguna entidad (personas, servicios, viviendas, edificios) dentro de esa área. Entre las variables comúnmente utilizadas dentro de los reglamentos intentan controlar y medir la ocupación que se ejerce sobre los suelos mediante parámetros calculables como altura de edificios, el coeficiente de ocupación del suelo (COS) y el coeficiente de utilización del suelo (CUS), cuyas siglas y nombres cambian según la región o país. A pesar de los esfuerzos por determinarla, no existen valores únicos o concordados de una densidad urbana ideal. La falta de claridad y sus múltiples facetas han hecho que su medición no sea siempre precisa o haga referencia a los mismos criterios cuando es analizada por distintos partidos. De acuerdo con Berghauer y Haupt (2007) sobre el uso de valores de densidad en el diseño urbano, su utilidad puede ser cuestionable cuando se analiza desde una perspectiva estadística, ya que no es capaz de reflejar del todo las características espaciales de los entornos urbanos, por lo que desde el año 2004 ha venido desarrollando el análisis de la densidad desde una perspectiva morfológica mediante la correlación de cinco variables: coeficiente de utilización de suelo (floor space index —FSI), coeficiente de ocupación (ground space index —GSI), proporción de espacio libre (open space ratio —OSR), capas o niveles (layers —L) y la densidad de conexión (network density —N). Todas ellas combinadas en un diagrama al que llamaron Spacemate, ubicando el

valor CUS (FSI) en el eje de las ordenadas, el valor COS (GSI) en el eje de las abscisas. Los valores OSR y L se encuentran como gradientes sobresalientes dentro del mismo.

El estudio de la densidad dentro de las ciudades ha tomado una connotación descriptiva y prescriptiva que analiza lo existente y busca ofrecer soluciones a las consecuencias muchas veces relacionadas con el crecimiento disperso (Berghauer y Haupt, 2010). El término dispersión urbana es utilizado para indicar baja densidad, discontinuidad, dependencia del automóvil y un inadecuado desarrollo urbano generalmente utilizado de una manera peyorativa pero nunca claramente definida, que conlleva a un mayor gasto de construcción, servicios e infraestructura; además requiere de un sistema complejo de gestión (Fernandez, 2007). Es también una desventaja desde el punto de vista medioambiental, ya que se necesita mayor energía y es más contaminante que los asentamientos con mayor densidad y compactos. Es causante de poca diversificación social y de servicios, conlleva a una elevada presencia de viviendas unifamiliares aisladas y alineadas que implican un aumento de precios de construcción y energía incorporada (Indovina, 2007). Puede decirse que este crecimiento urbano no adopta o sigue las necesidades de los residentes y como resultado de este proceso los territorios antes destinados para conservación, áreas verdes o reserva, son ahora utilizados para la construcción de vivienda (Habibi, 2011). A pesar de los esfuerzos para limitar este tipo de modelo descontrolado, la dispersión urbana sigue en aumento en ciudades por todo el mundo (Brueggemann, 2005). “Es un proceso de degradación que va a generar a la larga mayores costes sociales y económicos y en definitiva ambientales” (Indovina, 2007). Por el contrario, ciudad compacta vendría a ser aquella con altas densidades, presenta mezcla de usos, y su crecimiento se encuentra delimitado (Nevado García, 2019).

Las ventajas a la hora de hablar de mayores densidades o ciudades compactas están ampliamente referenciadas a los nuevos conceptos de urbanismo sustentable: reducción de la demanda de uso de suelo, reducción de la dispersión y sue-

lo rural, eficiencia de los sistemas de transporte público, reducción de desplazamiento, incremento de número equipamientos y servicios públicos, generación de entornos peatonales, entre otros (Vaggione, 2014; Forsyth et al., 2016). Como solución al crecimiento disperso de las ciudades y bajo la premisa de los beneficios de la ciudad compacta, la estrategia de densificación de las ciudades propone el reordenamiento de grandes áreas localizadas que se encuentren mal utilizadas, deterioradas o desocupadas, como pueden ser zonas habitacionales antiguas de baja densidad poblacional, equipamientos de gran tamaño en desuso, zonas industriales, entre otras (Salazar, 2001). En los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible y en múltiples estudios se reconocen los riesgos ambientales y de aumento de consumo de energía de la dispersión urbana y crecimiento en baja densidad y al mismo tiempo destaca beneficios económicos de la ciudad compacta desde la perspectiva de conectividad, economía, de interacción social y medioambiental (Naciones Unidas, 2021; Fernández, 2007; Indovina, 2007).

Puesto que el desempeño energético de una edificación es considerado dependiente de la geometría urbana (Ratti, Baker y Steemers, 2005; Salvati, Palme, Chiesa y Kolokotroni, 2020), los cambios que ejercen las estrategias de densificación alteran la geometría del contexto al modificar la ocupación que se ejerce sobre los suelos y su intensidad de utilización, por lo que será necesario estudiar sus efectos en el rendimiento energético de las edificaciones.

Inicialmente, la relación entre la densidad, forma urbana y el consumo energético fue estudiado a gran escala por Steadman (1977) al observar parámetros de densidad y forma, concluyendo que altas densidades resultan ser más eficientes energéticamente a nivel ciudad; posteriormente determina que la forma urbana presenta dos relaciones importantes con el desempeño energético de la edificación: una directa que contempla la obstrucción de la radiación por la morfología, y otra indirecta en cuanto a la modificación del microclima o intensidad del efecto de isla de calor que afecta el comportamiento térmico de las edificaciones, y por lo tanto su desempeño energé-

tico (Moreno y Steadman, 2014). Su iniciativa dio pie a múltiples estudios (Steemers, 2003) orientados a la demanda de las edificaciones, enfocándose principalmente en el acceso a la luz natural, ganancias solares y ventilación natural (Hui, 2001), buscando demostrar la relación intrínseca entre la densidad y la eficiencia energética (Larivière y Lafrance, 1999; Steemers, 2003). A nivel edificio, los hermanos Olgyay (1963) consideraron principios científicos básicos para obtener aproximaciones de consumo que posteriormente sustentaron con modelos experimentales (Olgyay, 1967). Martin y March (1972) a su vez consideraron la relación con parámetros de densidad física como cobertura (equivalente al coeficiente de ocupación —COS), altura y profundidad de los edificios para observar los efectos en el acceso a la luz natural. En estudios más contemporáneos, Baker y Steemers (1995, 2000) desarrollaron el método LT, una herramienta para el diseño energético estratégico de no precisión, que busca calcular la demanda de energía de iluminación, calefacción y ventilación diferenciando zonas activas y pasivas (aquellas que necesitan energía y aquellas otras que pueden hacerse de sistemas pasivos para solventar luz, refrigeración y calefacción). Ratti et al. (2005) documentaron un efecto de casi el 10% en la relación entre la morfología urbana y el consumo energético anual por metro en edificios no residenciales. La mayoría de los estudios relacionados son aplicados a ciudades europeas y norteamericanas de climas fríos o templados, donde coinciden que a mayor altura de edificio, el área de obstrucción solar es mayor y repercute en el tiempo de exposición a la radiación directa (Ratti et al., 2005; Strømman-Andersen y Sattrup, 2011), el acceso pasivo a la radiación solar para iluminación y calefacción (Rode, Keim, Robazza, Viejo y Schofield, 2014). Por el contrario, autores que han analizado dicha relación en climas cálidos, han encontrado que morfologías más densas son capaces de crear microclimas más favorables y pueden repercutir a favor del ahorro de energía en las edificaciones (Shashua-Bar, Pearlmutter y Erell, 2009; Masmoudi y Mazouz, 2004; Ali-Toudert y Mayer, 2006).

Estudios más contemporáneos analizan configuraciones y formas específicas de los edificios a nivel urbano. Kämpf, Montavon, Bunyesc, Bolliger y Robinson (2010) compararon las repercusiones en el consumo mediante el uso de techos planos, techos inclinados y formaciones de patios, optimizando orientaciones y alturas de los edificios, cuyos resultados demostraron que el sistema de patios resulta ser óptimo para el clima frío de Basilea, Suiza. Basado en el método LT desarrollado por Baker y Steemers (2000), Ratti et al. (2005) exploran la estimación de los efectos de la textura urbana en el consumo energético de los edificios con un enfoque opuesto al de la ciencia de la construcción, definiendo valores por defecto para todas las variables, con excepción de aquéllos pertenecientes a la forma urbana como la proporción superficie/volumen de la textura y la sombra urbanas en tres ciudades distintas de clima frío (Londres, Toulouse y Berlín).

Hien, Jusuf, Samsudin, Eliza e Ignatius (2011) estudiaron el impacto de las condiciones urbanas en el consumo de edificios en el clima tropical de Singapur interpolando datos climáticos históricos y parámetros de morfología urbana como la altura de edificios, área expuesta, albedo promedio y factor de vista de suelo. Los modelos analizados fueron descritos y comparados utilizando los valores totales de área de construcción, coeficiente de utilización de suelo (CUS). El cálculo fue hecho mediante simulación energética en la herramienta Steve Tool (la cual genera predicciones de temperatura urbana) para diferentes casos en diferentes morfologías urbanas, y concluye que la altura de las edificaciones y la densidad muestran un alto grado de impacto al modificar la temperatura ambiente y por lo tanto en el desempeño del edificio, además de concluir que en las densidades menores con espacios más abiertos existe un incremento de temperatura durante el día por la cantidad de radiación recibida. Philipp Rode et al. (2014) analizaron la intensidad de la demanda de calefacción (kWh/m²/año) en muestras de 500 m x 500 m a través de simulación energética que modela las ganancias solares y las pérdidas de energía a través de la envolvente

para calcular la demanda de calefacción utilizando el diagrama SpaceMate desarrollado por Berghauser, Salvati, Coch y Morganti (2017), explora el doble efecto de la compacidad urbana en el desempeño energético de los edificios del clima mediterráneo, enfocándose en el efecto de isla de calor y la disminución de la radiación solar disponible de las fachadas. Toma como referencia el coeficiente de ocupación (señalado como site coverage ratio en su estudio), y utiliza un modelo homogéneo normalizado de la textura urbana por medio de bloques repetitivos para realizar una simulación energética a través de Design Builder y EnergyPlus (v.8.1), utilizando además un archivo climático modificado que toma en cuenta el efecto de isla de calor. Los resultados de la demanda energética se muestran con valores de intensidad anual total (kWh/m² año) para el uso de calefacción y refrigeración, y obtiene una relación linear correlacional entre la compacidad y la demanda de refrigeración, disminuyendo su consumo en los apartamentos estudiados gracias a la reducción de la radiación incidente (que supera el efecto de isla de calor). En cuanto al uso de calefacción, no se muestra una relación linear, pero sí un descenso en consumo en los modelos de mayor compacidad. Estos resultados son consistentes con la metodología aplicada por Javanroodi et al. (2018) en el clima árido seco de la ciudad de Teherán al estudiar el impacto de la morfología urbana en el consumo de aire acondicionado y potencial de ventilación, estudiando los parámetros de morfología urbana y densidad definidos como: proporción entre volumen y área de construcción, coeficiente de ocupación COS (site coverage), coeficiente de utilización CUS (plot area ratio), densidad de edificios (número de edificios dividido entre el área de la muestra) y densidad en plano urbano. Los resultados se obtienen a través de varias herramientas de simulación en conjunto, tomando como motor de cálculo EnergyPlus. Un estudio en particular realizado en Suiza a nivel de barrio, crea tres distintos escenarios de análisis para una muestra de tejido urbano: (1) mejoras en los edificios, conservando la morfología del contexto; (2) densificación de acuerdo con los niveles permitidos por la nor-

mativa; (3) densificación con adaptaciones a la normativa. Se obtiene como resultado el análisis de efectos en densidad, movilidad, áreas verdes, costos de inversión, mezcla funcional y energía con base en estimaciones de cálculo con edificios de referencia y no un modelo que incluya las repercusiones físicas tomadas en cuenta por otros autores (Riera, Pérez y Rey, 2013).

Se presenta una metodología y su aplicación para el caso de estudio en la ciudad de Hermosillo (29°6'9" N, 110°58'38" O) con el objetivo de cuantificar el impacto de las variaciones de los parámetros de densidad COS, CUS y número de niveles, sobre la intensidad de uso de energía (kWh/m² año) en aire acondicionado y calefacción de las viviendas del clima cálido seco. Dicho proceso ayudará a evaluar la densificación como estrategia de mitigación del cambio climático y planeación urbana enfocada en la compacidad.

MÉTODO

La metodología utilizada se estructuró en cinco etapas. La primera consistió en el (1) análisis del contexto y preexistencias ambientales del caso de estudio: ubicación, clima y tipo de crecimiento, para definir después una (2) muestra de morfología urbana (MMU) bajo los criterios óptimos de densificación en relación con la accesibilidad al transporte público, antigüedad y cronología de construcciones existentes por sectores, efecto de isla de calor, valor comercial y programas de mejoramiento existentes en la ciudad. Enseguida se definieron los (3) escenarios densificados manteniendo las dimensiones existentes de la trama urbana (vialidades y banquetas) y se modifican los valores COS y CUS bajo esquemas volumétricos que consideren una viabilidad en el crecimiento. La cuarta etapa corresponde a la (4) evaluación de los escenarios de forma individual, el escenario existente y los propuestos desde dos perspectivas: paramétrica y energética. En la primera, fueron calculados los parámetros de densidad y morfología de los escenarios que fueron presentados como base en la selección de la muestra de análisis y muestra de morfología

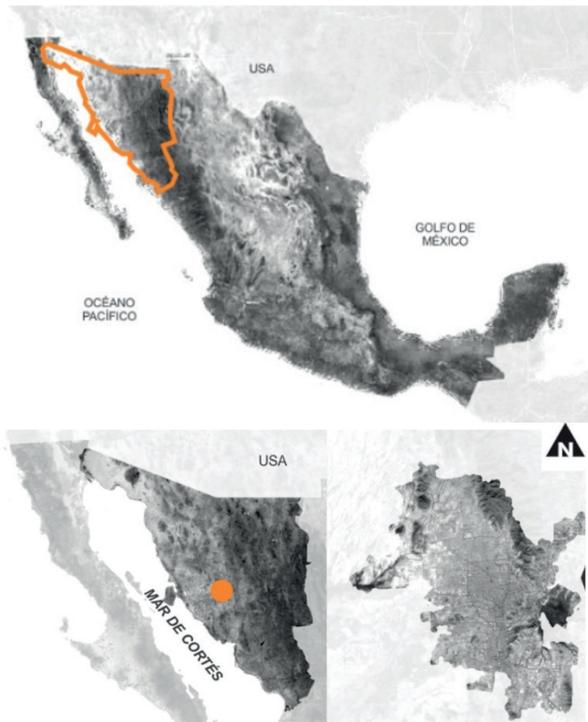
urbana: coeficiente de ocupación de suelo (COS), coeficiente de utilización de suelo (CUS). En la segunda etapa correspondiente a la evaluación energética, se efectuaron los cálculos referentes al comportamiento energético de las viviendas dentro de los escenarios propuestos en la MMU, utilizando el motor de cálculo EnergyPlus y la interfaz Design Builder para obtener la intensidad de uso de energía anual. Como quinta y última etapa se analizaron los (5) resultados por medio de gráficas de tres variables, tomando como referencia el diagrama SpaceMate desarrollado por Berghauser.

En este trabajo se intenta contribuir al estudio de las ventajas del crecimiento compacto a través de la densificación urbana, enfocándose en su impacto en el consumo energético de las viviendas.

CASO DE ESTUDIO

FIGURA 1

Ubicación de la ciudad de Hermosillo, Sonora



Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth (2021).

La ciudad de Hermosillo se localiza en el estado de Sonora, en México (29°6'9" N, 110°58'38" W) (figura 1). Cuenta con una superficie de 168.2 km², que albergaba una población de 855,563 habitantes al año 2020 (INEGI, 2020a), con una densidad de 5,046 hab/km². Comúnmente, ciudades de este tamaño no suelen ser analizadas en los estudios urbanos, pero es considerada una ciudad media según los estándares urbanos del país, que registran crecimientos físicos importantes en su extensión y demografía. Su crecimiento horizontal y expansivo en las últimas décadas ha sido tema de estudio reciente (Mercado y Marincic, 2017; López Ordóñez, 2015; López-Ordóñez, Crespo y Roset, 2018), trayendo consigo propuestas de redensificación de zonas urbanas existentes y cambios superficiales en la normativa que impulsen el desarrollo vertical en algunas áreas de la ciudad.

Su clima también aporta también cierta complejidad a la manera de vivir y diseñar ciudad.

Según la clasificación de Köppen, la zona metropolitana de Hermosillo tiene un clima de tipo cálido seco (BWh) (Beck, 2018). De acuerdo con la carta de climas del INEGI (2022b), que utiliza el sistema de Köppen modificado por Enriqueta García, Hermosillo cuenta con un clima "seco cálido muy seco". Pueden considerarse los meses de abril a octubre como temporada cálida, con temperaturas que van de los 24.3° hasta los 39.0° C, con una máxima extrema registrada de hasta 47.5° C. Durante el invierno (entre diciembre y febrero) el clima se caracteriza como templado con noches frescas y días tibios, temperaturas mínimas medias de 9.4° C hasta los 28° C durante el día.

SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE ANÁLISIS Y MORFOLOGÍA

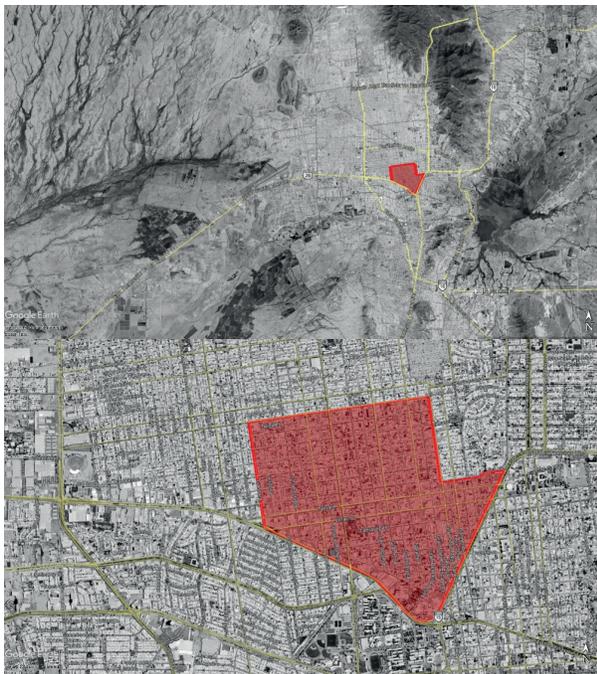
La selección de la zona de muestra se realizó de manera no probabilística y se basó en distintos enfoques utilizados a manera de filtros para la selección de la muestra: planeación de rutas inteligentes de transporte público, antigüedad y cronología de construcciones existentes por sectores, estudios del efecto de isla de calor, va-

lor comercial de las viviendas y terrenos, y programas de mejoramiento existentes en la ciudad.

Tras el análisis, se eligió la colonia San Benito como una de las zonas con más viabilidad para proyectos de densificación. Existe una tendencia actual de transformación urbana en la zona, donde las construcciones son adquiridas, derrumbadas y sustituidas en su mayoría por locales comerciales, bodegas y algunos departamentos. Es decir, el cambio de la morfología, uso y densidad está sucediendo actualmente, sin una tendencia planeada ni orientada al uso mixto de viviendas y comercio. Además, su homogeneidad en trazo facilita la cuantificación de resultados, ya que todas sus calles y avenidas poseen derechos de vía de aproximadamente 18 metros de ancho y bloques de manzana rectangulares cercanos a los 8,000 metros cuadrados de superficie con lotes de 12.30 x 40.50 metros aproximadamente (véase figura 2).

FIGURA 2

Ubicación de la colonia Modelo en la ciudad de Hermosillo y tipología de manzana y calles



Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth (2021).

Se determinó una muestra de análisis de 57.69 hectáreas para el cálculo de densidad poblacio-

nal, de vivienda y de unidades mixtas, además de las características de su población y niveles de construcción. La tabla 1 muestra a manera de resumen dicha información. El 89% de construcciones se encuentran edificadas en un solo nivel y sólo el 11% presentan dos niveles. La mayor parte de ellas tiene uso habitacional con una densidad del 13.99 viviendas por hectárea.

TABLA 1

Resumen-muestra de análisis
para la colonia San benito

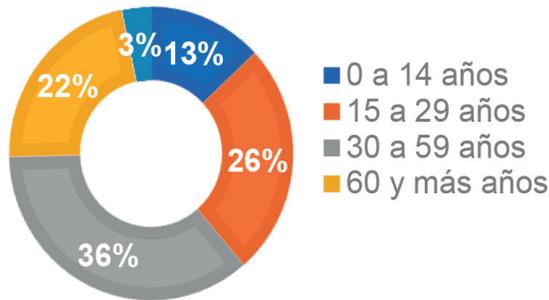
| Ficha resumen-muestra de análisis | | | |
|------------------------------------------|------------|--------------------|------|
| Escenario: estado actual | San Benito | | |
| Colindancias | Norte | Av. Michoacán | |
| | Este | Juan Aldama | |
| | Oeste | Priv. Gándara | |
| | Sur | Av. Aguascalientes | |
| Superficie de muestra | 576,869.50 | m ² | |
| | 57.69 | Ha. | |
| | 0.58 | Km ² | |
| Lotes | 1,075.00 | Lotes | |
| Superficie lote promedio | 446.70 | m ² | |
| Construcción total | 248,621.00 | m ² | 100% |
| Un nivel | 222,511.64 | m ² | 89% |
| Dos niveles | 26,109.36 | m ² | 11% |
| Población | 1,972.00 | | |
| Vivienda | 807.00 | | |
| Comercios | 321.00 | | |
| Densidad vivienda | 13.99 | viv/ha | |
| Densidad población | 34.18 | Hab/ha | |
| Densidad por unidad mixta | 19.55 | Unidad mixta/ha | |

Fuente: elaboración propia.

Según el último censo del INEGI, la población dentro de la muestra es relativamente adulta, ya que sólo 13% pertenece al grupo de entre 0 y 14 años, mientras que 58% tiene más de 30 años (gráfica 1). La densidad de población / hectárea es de 34.18, un 27% menos que la tendencia total de Hermosillo al año 2015 y 43% menos del valor óptimo propuesto por el municipio.

GRÁFICA 1

Edad de población en muestra



Fuente: INEGI (2015).

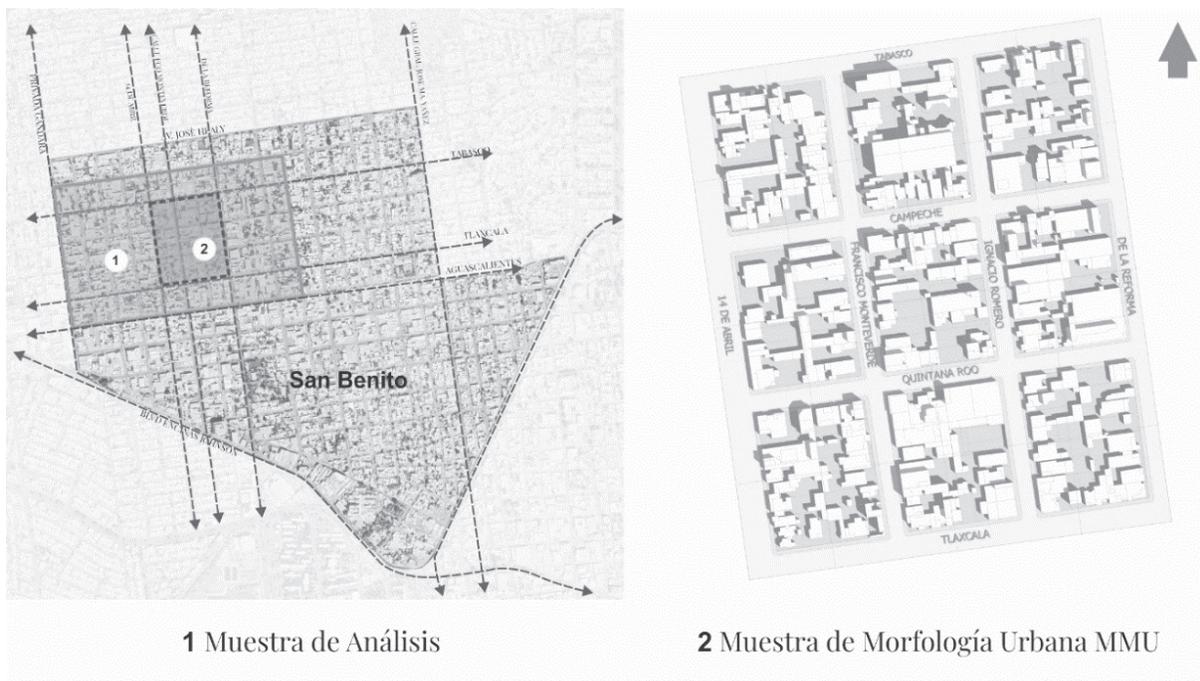
Dentro de la muestra de análisis, 18% de las viviendas se encuentran deshabitadas y se caracteriza por una densidad de 14 viviendas activas por hectárea. Este valor es 6.5 veces menor que el recomendado por los estudios publicados en el Ayuntamiento para dichas zonas. El 98% de la construcción se encuentra edificada a nivel de calle, mientras que sólo el 11% se presenta en un segundo nivel. Estos últimos datos son característicos de una zona considerada morfológicamente

de baja densidad cuando se hace referencia a la altura de las edificaciones.

Para el manejo de la información a escala urbana dentro de herramientas de simulación energética, la simplificación y reducción de variables es muy importante. Por lo cual se determinó una muestra de morfología urbana de mínimas dimensiones que cumple con la función de replicar la geometría urbana en torno a una unidad de análisis (una vivienda, una torre, una manzana) para cuantificar y estudiar los efectos al cambiar variables morfológicas. Cuenta como mínimo con nueve manzanas en total en una cuadrícula de 3 x 3 bloques, siendo el central el objeto de análisis. El bloque de manzana elegido para el estudio es representativo de la zona, cuenta derechos de vía de 18 metros en todos los sentidos y una superficie aproximada de 8,041 metros cuadrados (figura 3). Sus lados más largos se orientan al este y al oeste con una ligera orientación de ocho grados al noroeste. Colinda al norte con la avenida Campeche, al sur con la avenida Quintana Roo, al este con la calle Ignacio Romero y al oeste con la calle Francisco Monteverde.

FIGURA 3

Delimitación de la muestra de morfología urbana (MMU) en la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A EVALUAR

El estudio involucra la propuesta de múltiples escenarios de tejidos urbanos densificados de la MMU, modificando su densidad física y como consecuencia la morfología urbana. Estas opciones consideran y mantienen el arreglo existente de calles (dimensión y orientación) y bloques de manzana (80 m por lado). Dada la gran cantidad de configuraciones posibles de escenarios hipotéticos, la modificación de la morfología y geometría urbana dependerá estrechamente de la normatividad que regula los aspectos de alturas, límites de ocupación, y orientación preexistente de la vialidad. Por lo tanto, la propuesta o definición de los escenarios deberá contemplar los criterios al menos de forma básica. Se contempla entonces el reglamento de construcción de la ciudad de Hermosillo y el documento de ordenamiento territorial. En ambos casos se encuentran limitantes de coeficiente de ocupación de suelo, coeficiente de utilización, alturas máximas de edificación, y límites de construcción a partir de los límites de propiedad.

En la MMU la totalidad de los lotes o parcelas se catalogan de uso mixto por el PDMH, para el cual la edificabilidad permite considerar la verticalidad hasta en 12 niveles (no hace referencia a altura en metros). Además, la construcción dentro de cada lote es limitada por coeficiente de ocupación COS de 0.70, coeficiente de utilización de 8.40 y deberá tener un frente mínimo de ocho metros y una superficie mínima también de 200 metros cuadrados.

Además del COS especificado en el PDMH, deberá considerarse según la norma de construcción un área permeable del 5%, de la cual la mitad deberá ser vegetada, con el objetivo de mejorar la permeabilidad de la ciudad frente a los periodos de lluvia y generar un aumento de la masa vegetal en la ciudad.

Otra consideración importante será la que marca el plano de vialidades E8 del Programa de Desarrollo Urbano, que clasifica a las vialidades Monteverde y De la Reforma como “vialidad secundaria existente”. Para esta última existe una

restricción adicional de construcción de siete metros entre el límite de propiedad frente a la calle al interior del lote.

La elección de los escenarios parte, además, de la tendencia de compra y fusión de parcelas, y la oferta comercial aplicable. Además, se estudian tres formas de densificación: densificación horizontal, donde el crecimiento de ocupación del terreno sucede en el primer plano del terreno. Densificación vertical, respetando el coeficiente de ocupación de suelo promedio actual y proyectando un crecimiento de la superficie construida, aumentando el número de niveles. Y por último la combinación de la densificación horizontal y vertical. Debido a que los límites normativos en el área de estudio permiten la densificación, no se estudiará el caso fuera de los límites permitidos.

El desarrollo del experimento parte de la clasificación hecha por Martin y March en 1972 (figura 4). Para la MMU del caso, la forma genérica de desarrollo urbano lineal o tipo calle resultó mostrar más adaptabilidad a la tipología de desarrollo por lotes. Además, la tendencia de mercado inmobiliario en la zona muestra la fusión de dos a cuatro lotes, donde las construcciones existentes son reemplazadas por nuevos desarrollos, sucederá naturalmente si se visualiza desde la perspectiva de la manzana.

FIGURA 4

Formas genéricas urbanas,
basadas en Martin y March



De izquierda a derecha: desarrollo puntual o de núcleo (tipo pabellón), el desarrollo lineal (tipo calle) y el desarrollo en bloque o periférico (tipo patio). Fuente: Martin y March (1972).

La definición de los escenarios densificados de la MMU se describe numéricamente por medio de coeficientes en la tabla 2 (coeficientes, superficies y potencial de vivienda aproximada considerando un uso total habitacional o mixto). De manera volumétrica, en la figura 5 se ejemplifican dichos escenarios con base en un lote típico de esqui-

na de 12.50 metros de frente por 40 metros de profundidad. Toma en cuenta los siete metros de restricción al frente del lote y la construcción se extiende a lo ancho sin dejar pasillos de servicio. El resto del terreno no ocupado pasa a ser parte del patio trasero, creando un nuevo cañón al interior de las manzanas. Esta tipología permite imaginar escenarios de bloques de vivienda que ocupen más de un lote y se extiendan a lo largo de la manzana. La restricción de los siete metros frontales se respeta para todas las vialidades, ya que en la práctica común puede utilizarse como aparcamiento de vehículos de la primera planta comercial o de apartamentos. Los escenarios son considerados homogéneos, es decir, no se analizan diferentes tipologías constructivas dentro del mismo bloque. Esto permitirá facilitar el cálculo y simulación de los mismos.

A. **Densificación horizontal.** En este escenario el crecimiento sucede de manera expansiva y de forma horizontal. Las nuevas edificaciones no sobrepasan los dos niveles de altura, pero aumentan en su superficie de construcción y de ocupación. Este escenario es elegido debido a que un aumento de COS y CUS no necesariamente está ligado a la verticalidad y sin embargo el aumento de densidad sucede limitadamente a los valores máximos normativos de ocupación y las consecuencias tanto en el clima urbano como el desempeño energético de las edificaciones estarán ligados a la reducción de áreas desocupadas que podrían ser jardines o zonas con vegetación.

B. **Densificación vertical.** En este escenario se busca una densificación de crecimiento sólo en altura. Parte también de los valores promedios bases del estado actual en COS y CUS y busca superar el coeficiente de utilización de suelo aumentando el número de niveles en las edificaciones y manteniendo la ocupación según el factor base de 0.55 de la muestra de análisis.

C. **Densificación horizontal + vertical.** Este último escenario combina las dos densificaciones de los escenarios A y B, partiendo también de los valores base COS de 0.55 y CUS de 0.78, respectivamente. Busca aumentar su ocupación e intensidad de uso tanto en suelo como aire. Para el caso particular de la colonia San Benito, estos valores se estudiarán hasta los límites máximos normativos (COS 0.70, CUS 8.40).

Cada tipología de densificación A, B y C cuenta con subescenarios de distintos niveles de intervención, que parten del escenario actual hasta llegar a los límites normativos. La tabla 2 muestra los valores de densidad netos, el parámetro COS y CUS, además de los niveles considerados en altura. Los valores netos de cada escenario son menores que su versión de valor bruto. Esta diferencia estará ligada al espacio no utilizado dentro de los lotes y a la dotación de espacio público, áreas verdes y vialidades, definido también como espacio Tara por Berghouser y Haupt (2007). La importancia del conocimiento y distinción entre ambos valores radica en la literatura de normativa y propuestas urbanistas para las ciudades, ya que en referencia a tejido urbano y crecimiento se suelen utilizar valores brutos, mientras que en normativas de construcción se especifican valores netos.

La figura 5 muestra las volumetrías resultantes de las densidades propuestas resultado de las alteraciones en los valores COS (0.55) y CUS (0.68.) para los escenarios y subescenarios propuestos. Hasta este punto no se han hecho valoraciones sobre los posibles aspectos positivos o negativos de los escenarios de estudio y los valores se muestran como netos, es decir, dichos valores sólo contemplan lo que sucede dentro de los lotes sin tomar en cuenta el tejido urbano de calles, banquetas y equipamientos (valor bruto).

TABLA 2
Valores de densidad COS y CUS netos de escenarios densificados

| | Niveles | Densidad | | COS | | CUS | | |
|----------------------------------------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Hab/ha | Viv/ ha | Neto | Bruto | Neto | Bruto | |
| Actual | | 1 a 2 | 34 | 14 | 0.54 | 0.39 | 0.68 | 0.43 |
| A Densificación horizontal | A.1 | 1 | 35 | 20 | 0.60 | 0.44 | 0.60 | 0.44 |
| | A.2 | 1 | 38 | 21 | 0.65 | 0.47 | 0.65 | 0.47 |
| | A.3 | 1 | 41 | 23 | 0.70 | 0.51 | 0.70 | 0.51 |
| B Densificación vertical | B.1 | 2 | 65 | 36 | 0.55 | 0.40 | 1.10 | 0.79 |
| | B.2 | 4 | 130 | 72 | 0.55 | 0.40 | 2.20 | 1.56 |
| | B.3 | 6 | 194 | 108 | 0.55 | 0.40 | 3.30 | 2.33 |
| | B.4 | 8 | 259 | 144 | 0.55 | 0.40 | 4.40 | 3.10 |
| | B.5 | 10 | 324 | 180 | 0.55 | 0.40 | 5.50 | 3.87 |
| | B.6 | 12 | 389 | 216 | 0.55 | 0.40 | 6.60 | 4.64 |
| C Densificación horizontal + vertical | C.1 | 2 | 71 | 39 | 0.60 | 0.44 | 1.20 | 0.86 |
| | C.2 | 4 | 153 | 85 | 0.65 | 0.47 | 2.60 | 1.84 |
| | C.3 | 6 | 247 | 137 | 0.70 | 0.51 | 4.20 | 2.96 |
| | C.4 | 8 | 330 | 183 | 0.70 | 0.51 | 5.60 | 3.94 |
| | C.5 | 10 | 412 | 229 | 0.70 | 0.51 | 7.00 | 4.92 |
| | C.6 | 12 | 495 | 275 | 0.70 | 0.51 | 8.40 | 5.91 |

Fuente: elaboración propia.

EVALUACIÓN

Las siguientes evaluaciones del estudio se dividen en paramétrica y energética. En la primera, se analizan los coeficientes y valores de los parámetros elegidos en los escenarios densificados. En la segunda, se observan los datos arrojados por la evaluación energética a través de la simulación en software.

EVALUACIÓN PARAMÉTRICA

A partir de la propuesta de los escenarios A, B y C definidos por el número de niveles, COS y CUS, se estimaron los siguientes valores paramétricos:

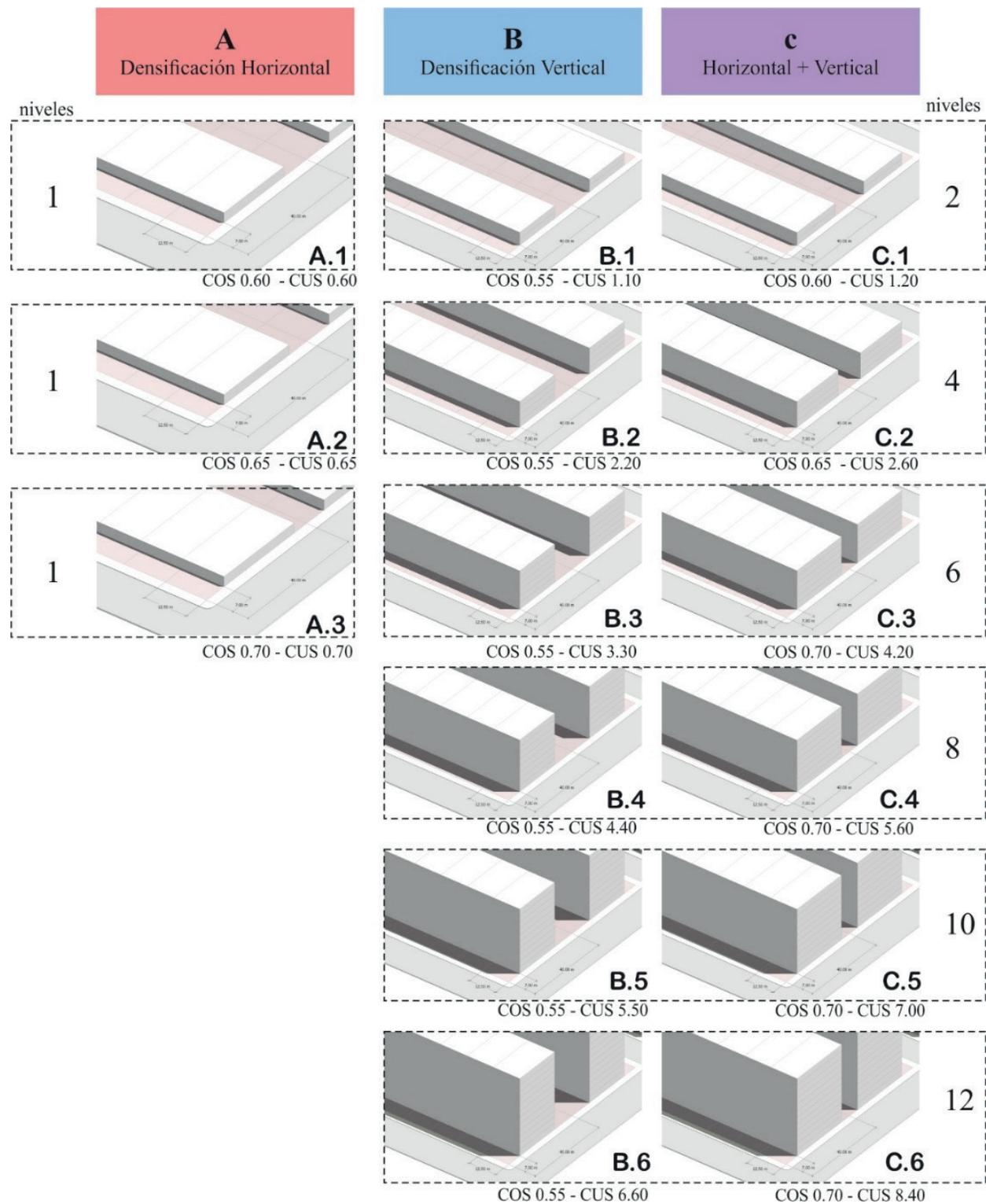
Proporción volumen / superficie de terreno (Vol/Lot). Para posibilitar el alcance del estudio, la proporción fue calculada utilizando valores medios de altura (2.80 metros por nivel). Por medio de la herramienta Arc Map de Autodesk, se procesaron datos catastrales GIS y se fabricaron reportes identificando las manzanas, superficie de lotes y la superficie construida por niveles. El volumen fue calculado multiplicando la superficie total por la altura media edificatoria.

Proporción de aspecto (H/w). Debido a la heterogeneidad de las construcciones en el estado actual de la muestra, el cálculo del parámetro H/w fue calculado a través de ocho secciones en dirección norte-sur, y seis secciones en la dirección este-oeste de cada manzana dentro de la MMU en los sentidos transversal y longitudinal.

Para los escenarios A, B y C donde las construcciones y ancho de vialidades se consideraron homogéneas, el cálculo de parámetros se realizó en hoja de cálculo, tomando en cuenta el número de niveles (2.70 m de altura promedio por nivel), el ancho de vialidad (18 m) y las restricciones de construcción (7m + 7m).

Proporción superficie de fachadas/superficie del terreno (Fach/Lot). En total, fueron analizados los 198 lotes y se consideró una altura promedio de 2.7 metros para calcular las superficies de fachada, multiplicándolo por los perímetros de las construcciones obtenidos de los reportes de ArcGIS por medio de hoja de cálculo. La superficie de terreno se obtuvo del mapa catastral de la ciudad de Hermosillo al año 2018. Para los subescenarios teóricos A, B y C se utilizaron los valores geométricos de cada propuesta, contemplando los niveles

FIGURA 5
Imágenes volumétricas comparativas de los escenarios



Fuente: elaboración propia.

en altura, la profundidad y ancho de los bloques dentro de cada lote para obtener las superficies de fachadas y dividir las entre la superficie total de ocupación. Las fachadas medianeras o adosadas fueron eliminadas del cálculo.

Proporción superficie de fachadas/área de construcción (Fach/Const). Este parámetro busca cuantificar la compacidad de las construcciones bajo la premisa de que un menor valor tendrá una compacidad más alta. Para su cálculo se utilizaron los mismos datos y hoja de cálculo que el parámetro de proporción superficie de fachadas/superficie de lote, con la diferencia del valor denominador que utiliza la suma de los metros cuadrados de construcción en planta baja y planta alta en cada lote.

La tabla 3 recopila los resultados del cálculo y medición de los parámetros antes descritos para los escenarios y subescenarios A, B y C. De acuerdo con los valores objetivos de densificación del documento Rethinking Hermosillo, los escenarios B.2 (cuatro niveles, COS neto 0.55, CUS neto 2.20), B.3 (seis niveles, COS neto 0.55, CUS neto 3.30), C.2 (cuatro niveles, COS neto 0.65, CUS neto 0.260), C.3 (seis niveles, COS neto 0.70, CUS neto 4.20) muestran valores similares según el número de viviendas que puede albergar (viviendas con superficies entre 90 -120 m²) y considera una mezcla de 80% uso habitacional + 20% uso comercial. Mayores o menores escalas de densidad podrían representar la subutilización o sobreutilización del terreno para la escala de la ciudad.

TABLA 3

Evaluación de parámetros de densidad y morfología urbana de los escenarios densificados A, B y C para la MMU

| | | Parámetro | | | |
|----------------------------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Vol/Lot | H/W | Fach/Lot | Fach/Const |
| Actual | | 1.88 | 0.14 | 1.72 | 5.56 |
| A Densificación horizontal | A.1 | 1.62 | 0.08 | 1.67 | 4.46 |
| | A.2 | 1.76 | 0.08 | 1.70 | 4.19 |
| | A.3 | 1.89 | 0.08 | 1.73 | 3.95 |

| | | Parámetro | | | |
|------------------------------------------------|-----|-----------|------|----------|------------|
| | | Vol/Lot | H/W | Fach/Lot | Fach/Const |
| B Densificación vertical | B.1 | 2.97 | 0.17 | 3.29 | 4.79 |
| | B.2 | 5.94 | 0.34 | 6.59 | 4.79 |
| | B.3 | 8.91 | 0.51 | 9.88 | 4.79 |
| | B.4 | 11.88 | 0.68 | 13.18 | 4.79 |
| | B.5 | 14.85 | 0.84 | 16.47 | 4.79 |
| | B.6 | 17.82 | 1.01 | 19.76 | 4.79 |
| C Densificación horizontal + vertical | C.1 | 3.24 | 0.17 | 3.35 | 4.46 |
| | C.2 | 7.02 | 0.34 | 6.80 | 4.19 |
| | C.3 | 11.34 | 0.51 | 10.37 | 3.95 |
| | C.4 | 15.12 | 0.68 | 13.82 | 3.95 |
| | C.5 | 18.90 | 0.84 | 17.28 | 3.95 |
| | C.6 | 22.68 | 1.01 | 20.74 | 3.95 |

Fuente: elaboración propia.

EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Con el objetivo de evaluar la intensidad de uso de energía de las viviendas en los diferentes escenarios densificados, se llevó a cabo una serie de simulaciones utilizando el motor de cálculo EnergyPlus en la interfaz Design Builder (V 6.1.5.004) que consideran una etapa previa de ajustes y preparación, y otra de evaluación utilizando los valores previos obtenidos en materialidad y condiciones de cálculo.

AJUSTES PREVIOS Y PREPARACIÓN PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Para el ajuste de los valores de cálculo en propiedades físicas de materiales, porcentaje de acristalamiento y condiciones ambientales, se realizó una campaña de medición previa in-situ para corroborar la similitud entre las condiciones reales y las simuladas en los valores de temperatura superficial de fachadas de las edificaciones de la muestra para el día 24 de octubre de 2020. Para ello, se eligieron ocho edificaciones representativas (figura 6) bajo las siguientes consideraciones:

- Disposición para la toma: durante la toma de mediciones, algunas fachadas estuvieron bloqueadas por vehículos u otros elementos temporales. En otros casos, la presencia de personas fue respetada por privacidad. Se eligieron aquellas fachadas que además no estuviesen bloqueadas por vegetación, estructuras metálicas o bardas.

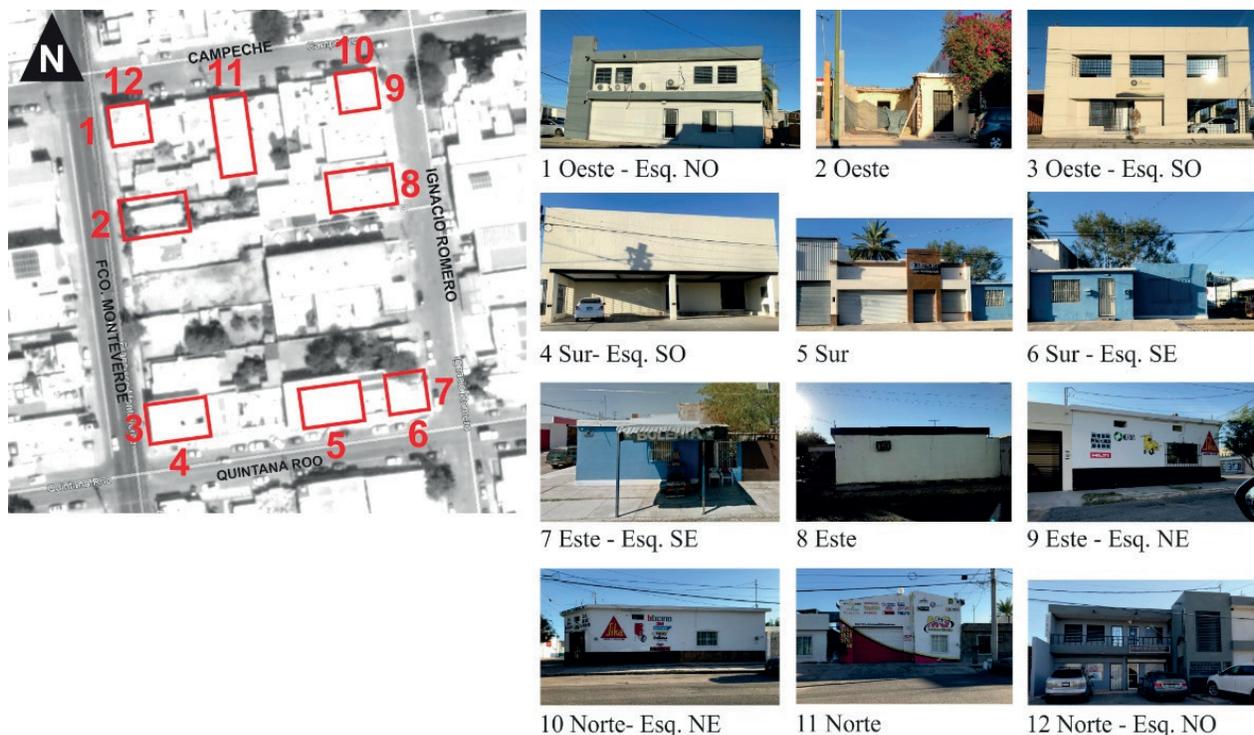
Representación de orientación: en total se registraron 12 fachadas representativas de cada orientación y su situación de manzana. Las edificaciones en esquina cuentan con dos fachadas en dos orientaciones distintas, y las otras que se encuentran en centros de manzana cuentan sólo con una. Para identificarlas en las siguientes tablas y esquemas, fueron numeradas en el siguiente orden y título según muestran las figuras 6 y 7.

cia.Intl.AP.761600_TMYX.2004-2018). Este archivo fue después modificado con los valores de temperatura y humedad monitoreados desde el portal Weather Underground (HERMOSIL47 29.082° N, 110.963° W).

Las mediciones de temperatura superficial de las fachadas se realizaron por medio de la cámara termográfica portátil del fabricante Fluke Thermography modelo Ti25 IR Fusion Technology, propiedad de la Universidad de Sonora (figura 8), número de serie 11020504. Esta herramienta

FIGURA 6

Ubicación de edificaciones dentro de la MMU para verificación



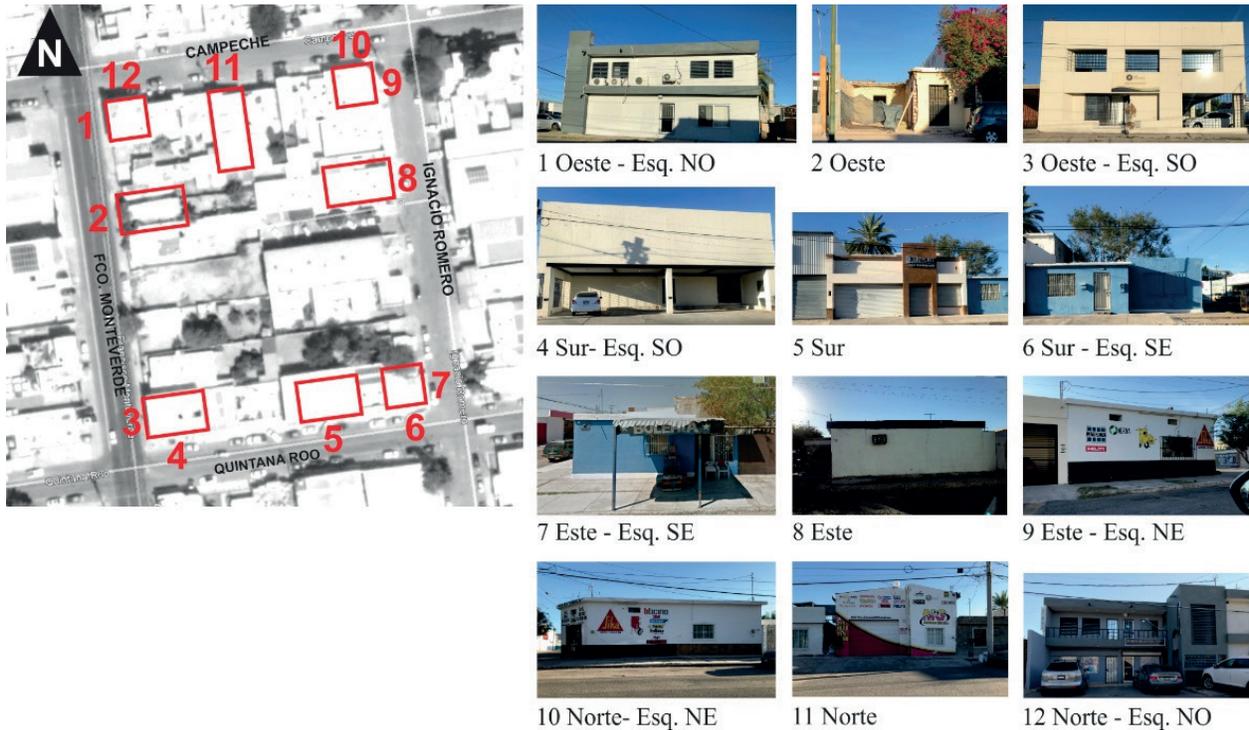
Fuente: elaboración propia a través de Google Earth (2021).

Con el objetivo de obtener resultados más cercanos a la toma in situ en las simulaciones, el archivo climático EPW utilizado dentro de la herramienta Design Builder cumple con los datos horarios de los días de medición (22 al 25 de octubre de 2020). Para ello se utilizó un archivo base en formato EPW del repositorio gratuito de datos climáticos para simulaciones de desempeño de edificios Climate. Onebuilding.org actualizada al 4 de julio de 2020 (nombre del archivo: MEX_SON_Hermosillo-Gar-

actúa como un procesador térmico de imágenes que produce imágenes térmicas y visuales en una pantalla LCD de 640 x 480 píxeles y pueden guardarse en una memoria SD integrada. Las imágenes registraron en tres tomas durante el día 24 de octubre de 2020: 10:00 a. m., 4:00 p. m., 7:00 p. m. de forma paralela a la fachada a una distancia aproximada de siete metros, tomando en cuenta la capacidad de apertura del lente.

FIGURA 7

Nomenclatura de fachadas seleccionadas de la MMU para verificación



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 8

Cámara termográfica portátil



Fuente: elaboración propia.

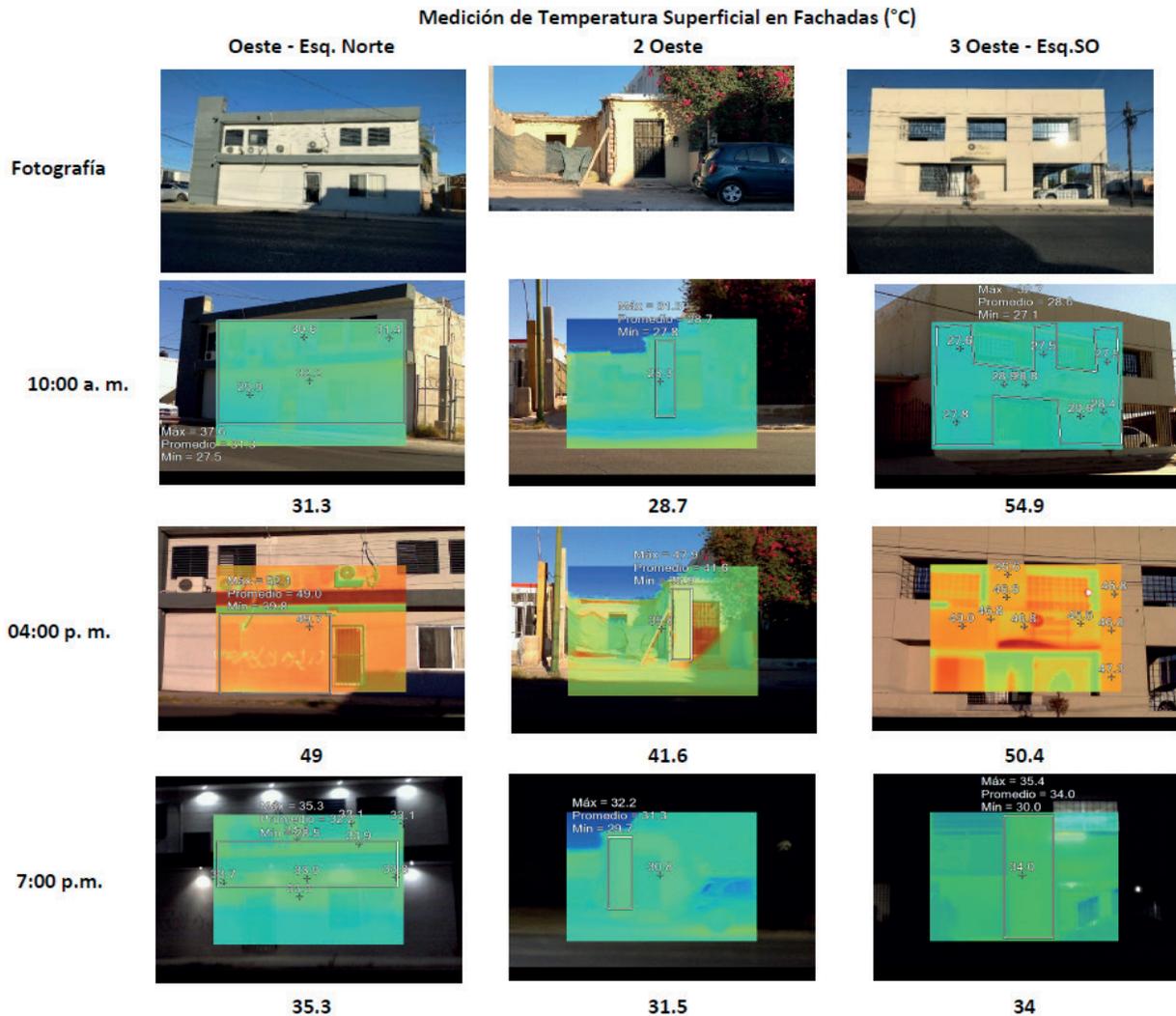
Posterior a la toma, se utilizó el software integrado SmartView® para realizar el análisis de las imágenes y la selección del área específica de fachada dentro de la imagen para obtener el valor promedio de temperatura superficial. Por

ejemplo, en la siguiente toma representativa de una fachada sur, se selecciona a manera de recuadro, específicamente el área de muro y se obtiene el valor máximo, promedio y mínimo. Ya que el objetivo de esta validación es su comparación con los resultados del simulador, se tomaron los valores promedio como dato principal.

A continuación se muestran los resultados de las tomas en las cuatro orientaciones de la manzana a tres distintas horas del día 24 de octubre de 2020, las fotografías del estado actual, las imágenes procesadas para la toma de la temperatura promedio de la superficie de muro de cada fachada, y la temperatura superficial promedio calculada. La figura 9 muestra un ejemplo del procesamiento de imágenes termográficas para una de las fachadas seleccionadas en la muestra. Este proceso fue aplicado para cada una de las 12 seleccionadas.

FIGURA 9

Ejemplo de toma de temperatura superficial para las fachadas oeste



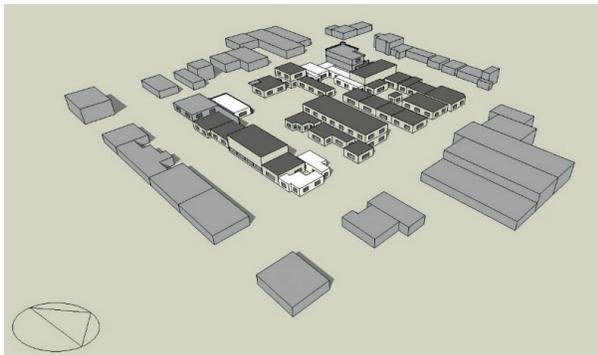
Fuente: elaboración propia.

El modelo creado en la interfaz de Design Builder (V 6.1.5.004) intenta emular el estado actual de la muestra de la morfología y las ocho edificaciones seleccionadas para la toma de temperatura en sus fachadas. Para ello, se crearon geometrías simples a partir de la herramienta Bloques de Edificios con una plantilla de relación muro-acristalamiento del 20%, resultado del análisis de fachadas de la muestra. Se incluyeron

además todas las demás edificaciones dentro de la manzana, como aquellas que la rodean para tomar en cuenta la proyección de sombras entre las mismas. La figura 10 muestra el modelo tridimensional de la MMU dentro de la interfaz, que incluye los 12 edificios analizados, los edificios adyacentes dentro del bloque de manzana y los bloques de edificaciones en las manzanas aledañas.

FIGURA 10

Esquema tridimensional del escenario actual en la interfaz del software Design Builder (V 6.1.5.004)



Fuente: elaboración propia.

Dado que la simplicidad de los métodos cumple un papel importante en el manejo de información a nivel urbano, la mayoría de las características térmicas de los materiales fueron obtenidas de tablas publicadas de fuentes oficiales y valores predeterminados por el programa. Se consideraron el día 24 de octubre y dos días anteriores para la simulación con resultados de forma diaria, horaria y subhoraria. Para el cálculo de sombreado se incluyeron todos los edificios con un algoritmo de modelado de cielo difuso simple. En la siguiente tabla se muestran los valores utilizados en los parámetros principales del modelo energético.

TABLA 4

Valores de ajuste del modelo energético para verificación de la MMU

| Parámetro | Valor |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidad de ocupación | 0.016 personas/m ² |
| Ganancias por ocupación | 2.16 W/m ² |
| Periodos de ocupación | Día de semana (lunes a viernes) 12-9 am, 4 pm-12 am / fin de semana (sábado y domingo): encendido |
| Consigna de calefacción | 18° C |

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Periodo de calefacción | Encendido 24/7 |
| Consigna de refrigeración | 25° C |
| Periodo de refrigeración | Encendido 24/7 |
| Ventilación natural | No |
| Tasa de infiltración | 0.5 ren/h |
| Tipo de muro y transmitancia | Block de concreto con aplanados exteriores a base de mortero de cemento / enjarres interiores de yeso = 3.615 W/m ² K |
| Tipo de losa y transmitancia | Losa de vigueta y casetón = 0.72 W/m ² K (Agencia Danesa de Energía, 2017). |
| Absortancia térmica | 0.6 |
| Absortancia solar | 0.6 |
| Porcentaje de acristalamiento | 20% |
| Tipo de acristalamiento y transmitancia | Vidrio sencillo de 6 mm -5.78 W/m ² K |
| Protecciones solares | Ninguna |
| Modelo de cielo | Cielo difuso simple |
| Periodo de simulación | 22 al 24 de octubre |

Fuente: elaboración propia.

Tras la simulación, se obtuvieron los datos de temperaturas superficiales exteriores por componente de muro en la pestaña de análisis de la herramienta. Los resultados de la toma de temperaturas superficiales in-situ fueron comparados con las calculadas por Design Builder, como se muestran en la tabla 5, con una diferencia máxima promedio de 3.4° C, mínima promedio 0.7° C, y media de 1.8° C. Por lo que se concluye que, integrando las características superficiales adecuadas de los materiales, propiedades superficiales, orientación y morfología del entorno, la herramienta llega a resultados lo suficientemente cercanos a la realidad.

TABLA 5
Comparación de temperaturas superficiales entre medición in-situ y simulación

| Hora | 1 Oeste - esq. norte | | | 2 Oeste | | | 3 Oeste - esq. so | | | 4 Sur - esq. so | | |
|-------------|----------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
| | Temperatura (° C) | | | | | | | | | | | |
| | Medición | Simulación | Diferencia | Medición | Simulación | Diferencia | Medición | Simulación | Diferencia | Medición | Simulación | Diferencia |
| 10:00 a. m. | 31.3 | 28.3 | 3.0 | 28.7 | 26.2 | 2.5 | 54.9 | 41.6 | 13.3 | 38.8 | 37.7 | 1.1 |
| 04:00 p. m. | 49.0 | 48.7 | 0.3 | 41.6 | 46.0 | 4.4 | 50.4 | 49.4 | 1.0 | 38.2 | 42.0 | 3.8 |
| 07:00 p. m. | 35.3 | 37.2 | 1.9 | 31.5 | 35.3 | 3.8 | 34.0 | 37.4 | 3.4 | 33.4 | 32.4 | 1.0 |
| | 5 Sur | | | 6 Sur- esq. se | | | 7 Este - esq. se | | | 8 Este | | |
| 10:00 a. m. | 38.1 | 37.5 | 0.6 | 45.0 | 44.6 | 0.4 | 43.1 | 42.6 | 0.5 | 35.9 | 35.8 | 0.1 |
| 04:00 p. m. | 38.1 | 44.3 | 6.2 | 44.7 | 44.2 | 0.5 | N/D | 36.6 | - | 34.9 | 33.0 | 1.9 |
| 07:00 p. m. | 30.6 | 35.4 | 4.8 | 34.1 | 34.0 | 0.1 | 31.5 | 31.5 | 0.0 | 30.7 | 31.0 | 0.3 |
| | 9 Este - esq. ne | | | 10 Norte - esq. ne | | | 11 Norte | | | 12 Norte - esq. no | | |
| 10:00 a. m. | 33.3 | 35.2 | 1.9 | 29.6 | 29.5 | 0.1 | 27.6 | 26.4 | 1.2 | 29.9 | 27.9 | 2.0 |
| 04:00 p. m. | 34.5 | 32.4 | 2.1 | 32.2 | 30.2 | 2.0 | 32.7 | 31.0 | 1.7 | 33.2 | 32.8 | 0.4 |
| 07:00 p. m. | 29.9 | 32.4 | 2.5 | 28.7 | 29.0 | 0.3 | 29.0 | 29.3 | 0.3 | 29.6 | 31.0 | 1.4 |

| Diferencias promedio entre medición y simulación | |
|--------------------------------------------------|--------|
| Diferencia mínima | 0.7° C |
| Diferencia promedio | 1.8° C |
| Diferencia máxima | 3.4° C |

Fuente: elaboración propia.

SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE LOS ESCENARIOS

La simulación energética de los escenarios consideró los siguientes criterios que parten de la campaña de preparación de ajustes y la morfología de los escenarios existentes y densificados:

Clima. Para la simulación se utilizó el archivo EPW original (nombre del archivo: MEX_SON_Hermosillo-Garcia.Intl.AP.761600_TMYX.2004-2018) para la ciudad de Hermosillo, obtenida del repositorio de datos climáticos Climate One Building Org.

Edificios. Se modelaron los edificios con la herramienta “bloques de edificio” nivel por nivel con las mismas propiedades de materiales y actividades representando las seis situaciones de contexto presentadas en la manzana y diseño de escenario. Los bloques adosados no modelados

a detalle fueron construidos con la herramienta “bloque de componente adiabático”, el cual representa en la simulación a un edificio con propiedades equivalentes al modelado en detalle. El detalle de modelado considerado representa las zonas térmicas de mayor importancia en un porcentaje de distribución de: recámaras 34%, aseo 7%, cocina 17%, área de estar 17% y circulaciones o servicios 24% (figura 11). Se utilizaron los valores de cargas térmicas predeterminadas del software sin considerar equipos de oficina.

Entorno. Fue modelado utilizando la herramienta “bloque de componente” tipo estándar, cuya geometría sólo interfiere en el cálculo de sombreado y no forma parte del panel de resultados de las simulaciones. Como se muestra en la figura 12, se modelaron únicamente los edificios en un contexto inmediato y no se tomó en cuenta vegetación o pavimentos.

FIGURA 11

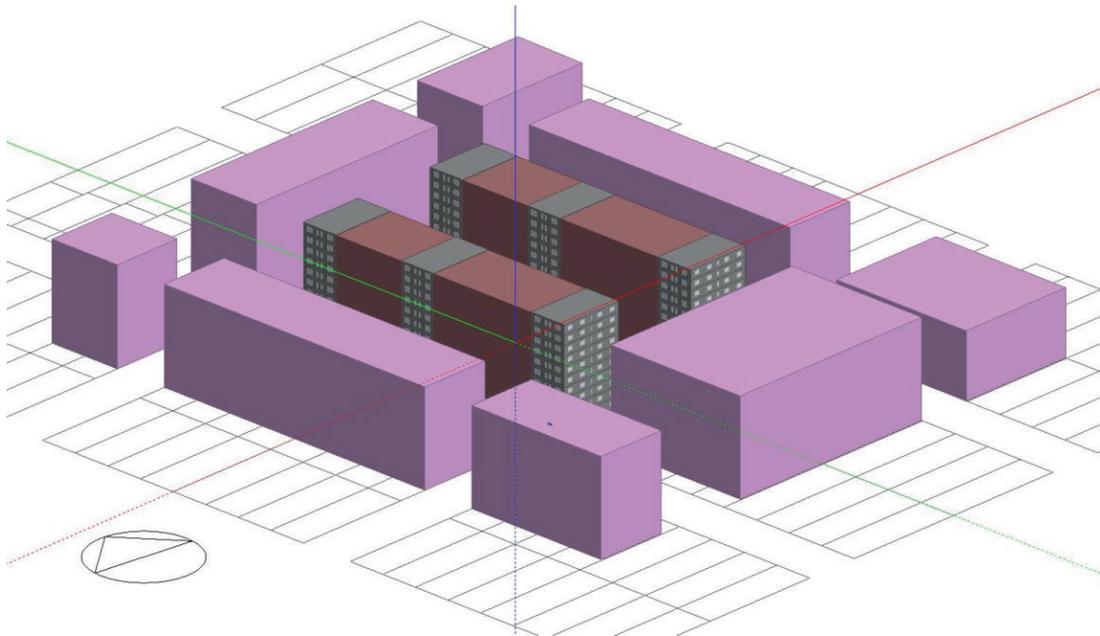
Ejemplo de zonificación interior dentro de la interfaz Design Builder



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 12

Ejemplo de modelación de bloques de edificios y contexto en software Design Builder.
Escenario densificado C.6.



Fuente: elaboración propia.

Actividad. Se utilizaron las plantillas precargadas del software según el tipo de área en la zona para facilitar la modelación de los edificios. Cabe recordar que dichas consideraciones fueron aplicadas en todos los niveles, de todos los bloques de edificios y en todos los escenarios:

- Cocina: Dwell_DomKitchen_Occ.
- Recámaras: Dwell_DomBed_Occ.
- Baños: Dwell_DomCommonAreas_Occ.
- Circulaciones: Dwell_DomCirculation_Occ.

Para determinar los valores para tipos de cerramientos, porcentaje de acristalamiento, sistemas de acondicionamiento y consumo de energía se utilizaron los mismos criterios que en la simulación del estado actual mostrados en la tabla 5. El periodo de simulación fue considerado de forma anual con desgloses mensuales de consumo eléctrico.

RESULTADOS

Se efectuaron un total de 16 simulaciones que corresponden a los escenarios previamente definidos en la investigación. Se incluye el escenario de estado actual para el cual los parámetros de ocupación, utilización, alturas de edificaciones y materiales fueron normalizados para mayor simplicidad en el cálculo y modelo. En una primera fase se muestran los totales anuales de intensidad de uso de energía de cada uno de los escenarios, seguido por su comparación con los parámetros de mayor relación entre las características “morfología” y “densidad” según la bibliografía analizada: COS, CUS, y parámetros morfológicos (Vol/Lot, H/w, Fach/Lot y Fach/Const). Para dicho análisis se toma como punto de referencia el escenario actual (escenario E).

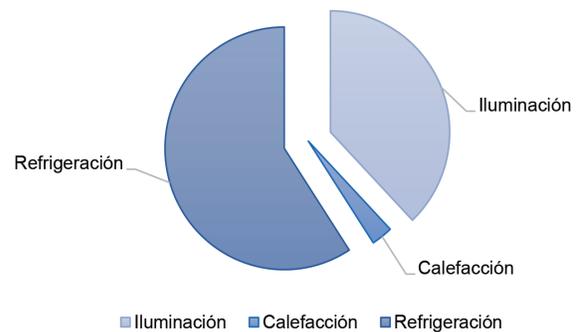
INTENSIDAD DE USO DE ENERGÍA (IUE)

El desglose de consumo promedio anual de todos los escenarios que se muestran en la gráfica 11 analizados entre los usos analizados, arrojan

un aporte mayoritario por parte del uso de refrigeración, seguido por la calefacción y, por último, iluminación. Dicho resultado confirma la importancia de la investigación y búsqueda de estrategias para minimizar sus aportaciones en los edificios. A partir de aquí, las comparaciones con aspectos energéticos se enfocarán en el uso de refrigeración y calefacción.

GRÁFICA 2

Porcentaje de consumo de energía promedio anual para todos los escenarios



Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla muestra datos de la intensidad de uso de energía (EUI) (kWh/m²/año) desglosados por escenario y tipo de consumo final (refrigeración y calefacción). Como se puede observar, los escenarios tipo A que consideran sólo una densificación horizontal dentro de los límites normativos, reducen entre 6 y 12% el valor EUI y IEC comparados con el escenario existente. Mientras que en el escenario B, donde ocurre sólo una densificación vertical, las reducciones en consumo se observan sólo en los escenarios B.4 (7%), B.5 (15%) y B.6 (29%), es decir, en los escenarios con elevaciones de 8, 10 y 12 niveles que conservan el parámetro COS igual al escenario existente. Los escenarios C que consideran la densificación vertical+horizontal hasta los límites normativos alcanzan una mayor reducción considerable a partir del escenario C3 con bloques de seis niveles, llegando hasta una reducción de hasta el 57% en el escenario C6 debido a la disminución considerable en el uso de refrigeración.

TABLA 6

Resultados de intensidad de uso de energía en escenarios densificados A, B y C en muestra de colonia San Benito

| Escenario | | Intensidad de uso de energía kWh/m ² /año | | | |
|---------------------------|----|------------------------------------------------------|---------------|-------|------|
| | | Calefacción | Refrigeración | Total | Dif. |
| Existente | E | 1.07 | 36.62 | 37.70 | - |
| A (Horizontal) | A1 | 1.0 | 34.3 | 35.34 | 6% |
| | A2 | 1.1 | 32.1 | 33.15 | 12% |
| | A3 | 1.1 | 32.1 | 33.15 | 12% |
| B (Vertical) | B1 | 0.8 | 41.7 | 42.4 | -13% |
| | B2 | 1.0 | 37.2 | 38.2 | -1% |
| | B3 | 0.7 | 37.6 | 38.3 | -2% |
| | B4 | 0.8 | 34.2 | 35.0 | 7% |
| | B5 | 1.0 | 31.0 | 32.0 | 15% |
| | B6 | 0.8 | 25.8 | 26.7 | 29% |
| C (Horizontal + vertical) | C1 | 0.7 | 38.5 | 39.28 | -4% |
| | C2 | 0.7 | 35.0 | 35.63 | 5% |
| | C3 | 2.7 | 18.9 | 21.65 | 43% |
| | C4 | 3.0 | 16.5 | 19.51 | 48% |
| | C5 | 3.3 | 14.5 | 17.81 | 53% |
| | C6 | 3.5 | 12.8 | 16.35 | 57% |

Fuente: elaboración propia.

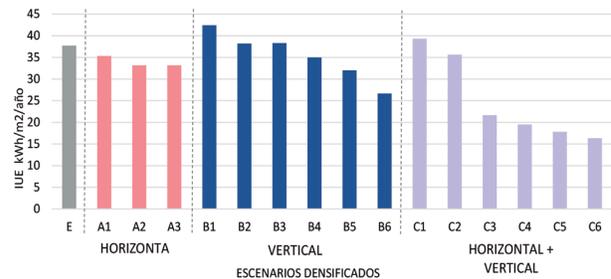
Como se muestra en la gráfica 3, con excepción de los escenarios B1, B2, B3 y B4 existe una tendencia a la disminución del consumo de energía cuando la densificación aumenta, ya sea en el sentido horizontal y/o vertical. Dichas excepciones, que representan un aumento en la IUE, se deben a la reducción de superficie en contacto con el terreno, que en los meses cálidos favorece la pérdida de calor a través del suelo. Por el contrario, las reducciones en consumo son más notorias en los escenarios tipo C (densificación horizontal y vertical), seguidos por los escenarios tipo B (densificación vertical) y por último el escenario tipo A (densificación horizontal).

Si se analiza la información por escenario, en todos ellos existe una tendencia de relación inversa entre el consumo de aire acondicionado y la densificación. Mientras que esta relación se vuelve directa si la comparamos con el uso

de calefacción. Cabe destacar que el escenario mayormente densificado, C6, es el que logra una mayor reducción en el consumo total de energía anual por metro cuadrado y uso de aire acondicionado, mientras que también se muestra con el mayor consumo de calefacción.

GRÁFICA 3

Intensidad de uso de energía anual (EUI) por escenario MMU, colonia San Benito

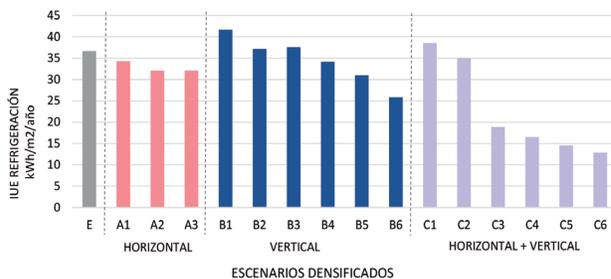


Fuente: elaboración propia.

Las gráficas 4 y 5 muestran los promedios anuales de intensidad de consumo pertenecientes a los usos de refrigeración y calefacción. De nueva cuenta, en las tres tipologías de densificación, A, B y C, se muestra una disminución continua en el uso de refrigeración (gráfica 14), mientras que en el uso de la calefacción esta relación es inversa y se vuelve más notoria en el escenario tipo C. Sin embargo, en valores totales de consumo anual, el aumento del uso de calefacción, tal como se muestra, no altera la tendencia de disminución de intensidad de uso de energía en los escenarios.

GRÁFICA 4

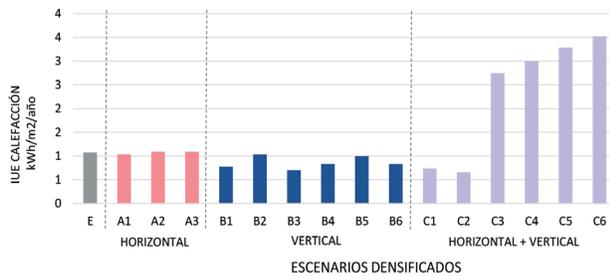
Promedio anual de intensidad de consumo de energía en uso de aire acondicionado para escenarios densificados de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 5

Promedio anual de intensidad de consumo de energía en uso de calefacción para escenarios densificados de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

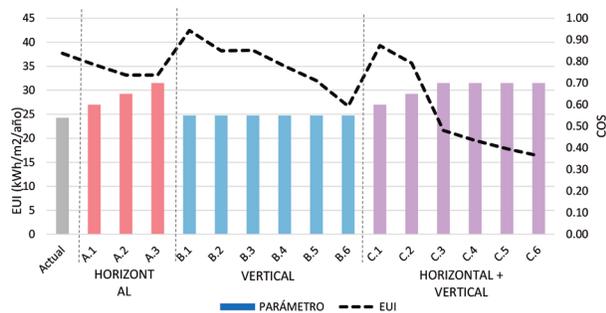
A continuación se comparan los parámetros morfológicos COS y CUS con la intensidad de uso de energía (IUE) de los escenarios densificados. El objetivo es observar la relación entre ambos y definir la viabilidad de utilización como referente de consumo de energía a nivel urbano.

OCUPACIÓN Y UTILIZACIÓN

La gráfica 6 muestra la relación entre los valores totales anuales de la intensidad de uso de energía (IUE) de los escenarios analizados y el coeficiente de ocupación de suelos de estos mismos. El gráfico muestra por escenario una relación inversa en los escenarios de densificación horizontal A1, A2 y A3, y los tres primeros del escenario C. En los escenarios que consideran un crecimiento sólo vertical (escenarios B1, B2, B3, B4, B5, B6, C3, C4, C5 y C6) la IUE sigue demostrando descenso, mientras que el valor COS se mantiene constante.

GRÁFICA 6

Relación entre IUE y COS por escenarios en la colonia San Benito

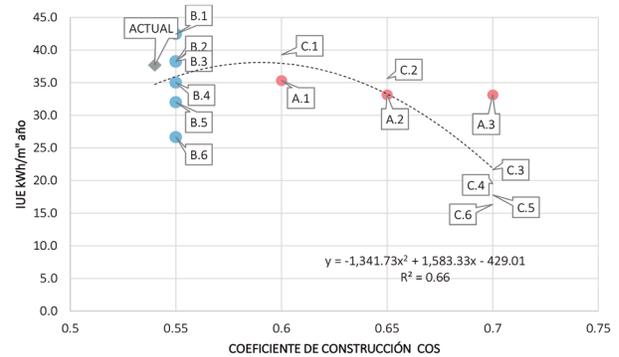


Fuente: elaboración propia.

La gráfica 7 muestra la relación entre los valores de IUE y COS con la R2 de 0.66, demostrando una relación por arriba de la media entre el parámetro y la IUE.

GRÁFICA 7

Línea de tendencia comparativa entre IUE y COS, colonia San Benito

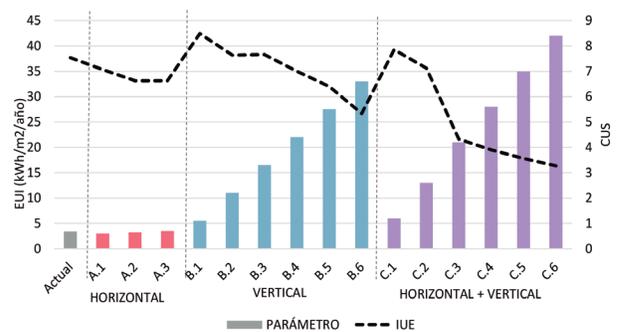


Fuente: elaboración propia.

Los valores que arroja la comparación entre IUE y CUS muestran una relación inversa constante en todos los escenarios densificados, a mayor valor CUS, menor la intensidad de uso de energía (gráfica 8). Los escenarios C (densificación en ambos sentidos) muestran una relación mucho más notoria. Según el resultado de la ecuación de la línea tendencial, el coeficiente de determinación R2 tiene un valor de 0.71, que puede calificarse como positivo (gráfica 9).

GRÁFICA 8

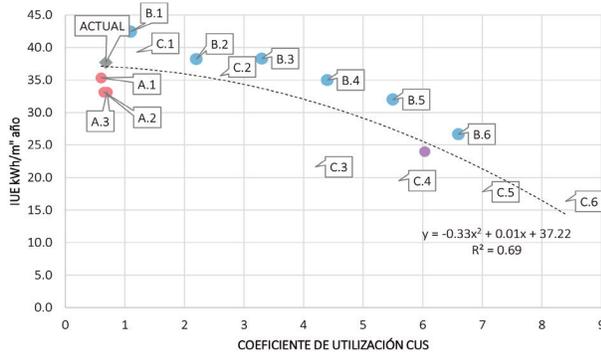
Relación entre IUE y CUS por escenarios, colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 9

Línea de tendencia comparativa entre IUE y CUS, colonia San Benito

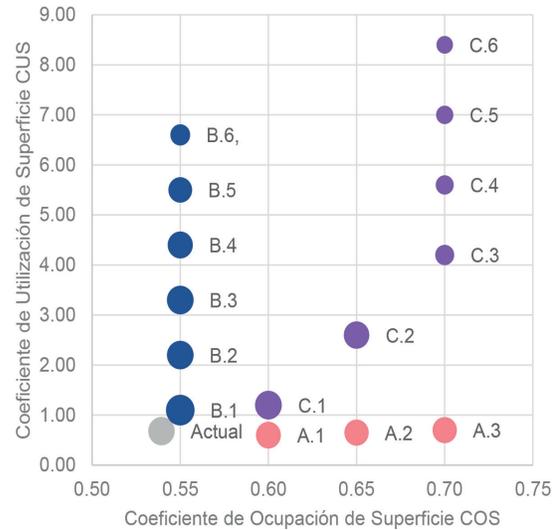


Fuente: elaboración propia.

A manera de resumen, la gráfica 10 muestra el ahorro de energía basado en el criterio desarrollado por Berghauser en su diagrama Spacemate. El gráfico permite visualizar tres variables: COS, CUS e IUE. El tamaño de la esfera representa la disminución o ahorro de la intensidad de consumo, mostrando que aquellos escenarios con mayor densificación en ambos sentidos logran una mayor disminución, seguido por la densificación únicamente vertical y que mantiene una ocupación de suelo igual a la existente. La densificación horizontal presenta una menor disminución en comparación con los otros escenarios. Los escenarios tipo A que consideran sólo una densificación horizontal dentro de los límites normativos, reducen entre 6 y 12% el valor EUI e IEC comparados con el escenario existente. Mientras que en escenario B donde ocurre sólo una densificación vertical, las reducciones en consumo se observan sólo en los escenarios B.4, B.5 y B.6, es decir, a partir de los escenarios con bloques de ocho niveles. Los escenarios C que consideran la densificación simultánea en sentido vertical y horizontal hasta los límites normativos, alcanzan una mayor reducción considerable a partir del escenario C3 con bloques de seis niveles, llegando hasta una reducción de hasta el 57% en el escenario C6 debido a la disminución considerable en el uso de refrigeración.

GRÁFICA 10

Comparativo de intensidad de uso de energía anual en escenarios A, B y C, COS y CUS de la colonia San Benito



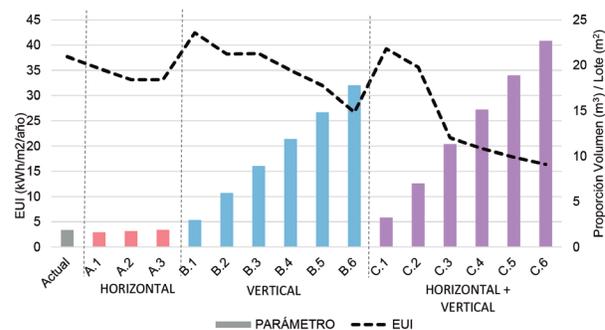
Fuente: elaboración propia.

PARÁMETRO VOLUMEN/SUPERFICIE DE TERRENO

La relación entre la intensidad de uso de energía y el parámetro volumen/superficie de terreno se muestra inversa en todos los escenarios densificados (gráfica 11). La gráfica 12 arroja una R2 de 0.7131, similar al parámetro anterior analizado, donde los escenarios C3 y C4 son los más alejados de la línea de tendencia.

GRÁFICA 11

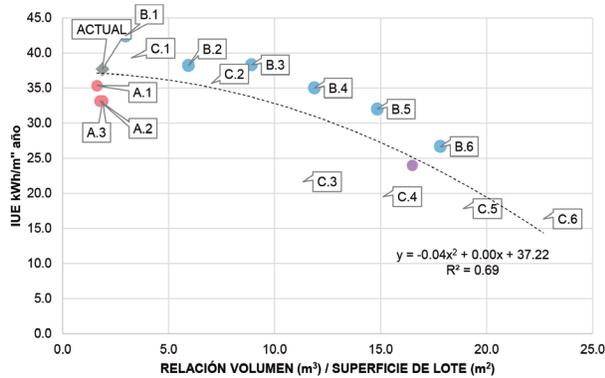
Relación entre IUE y proporción volumen / superficie de terreno (Vol/Lot)



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 12

Línea de tendencia comparativa entre IUE y proporción volumen / superficie de lote (Vol/Lot)

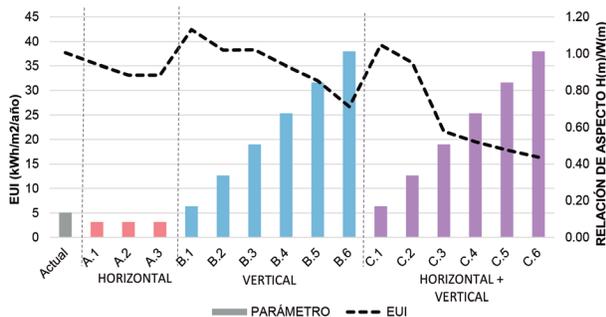


Fuente: elaboración propia.

PARÁMETRO DE RELACIÓN DE ASPECTO H/W
La relación con el parámetro de relación de aspecto H/W muestra algunas diferencias entre el comportamiento de la intensidad de consumo y los valores del parámetro. En los escenarios con densificación horizontal donde el valor H/W se mantiene constante al no modificar la altura de las edificaciones, la IUE decrece, y es sólo en los escenarios con densificación vertical donde se observa una relación inversa entre ambos parámetros (gráfica 13). El coeficiente de determinación de los datos obtenido (gráfica 14) tiene un valor medio de 0.542.

GRÁFICA 13

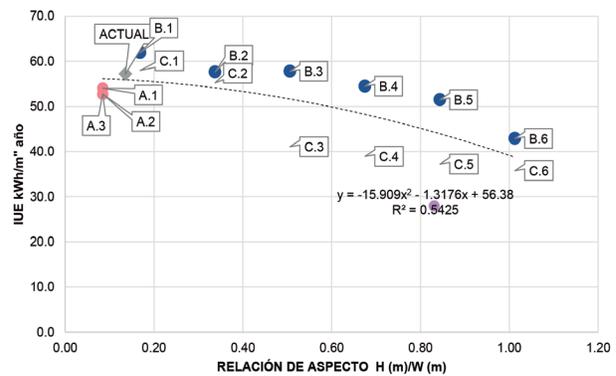
Relación entre IUE y relación de aspecto del cañón urbano (H/W) por escenarios de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 14

Línea de tendencia comparativa entre IUE y relación de aspecto del cañón urbano (H/W), colonia San Benito



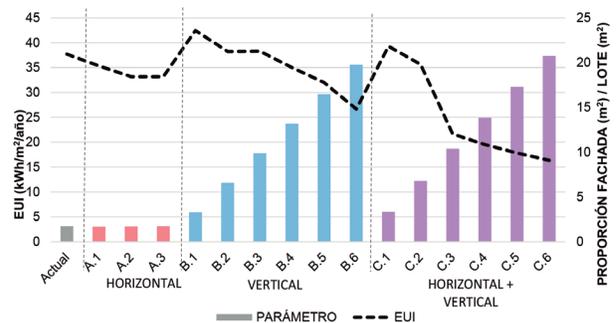
Fuente: elaboración propia.

PARÁMETRO DE RELACIÓN FACHADA Y SUPERFICIE DE TERRENO

La muestra como el parámetro proporción de superficie de fachadas de los escenarios estudiados se muestra con mayor intensidad de crecimiento en los escenarios que integran crecimiento vertical (B y C), mientras que en el escenario sólo con crecimiento horizontal, el cambio es menos gradual. En cuanto a su relación con la IUE, en todos los escenarios una relación inversa, cuanto mayor es la proporción fachada//lote menor es la intensidad de uso de energía. El coeficiente de determinación de los datos obtenido (gGráfica 28) tiene un valor medio de 0.59.

GRÁFICA 15

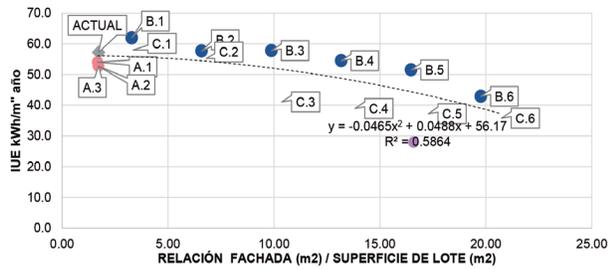
Relación entre IUE y parámetro de proporción de superficie de fachada y superficie de terreno por escenarios de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 16

Línea de tendencia comparativa entre IUE y proporción de superficie de fachada y superficie de terreno de la colonia San Benito



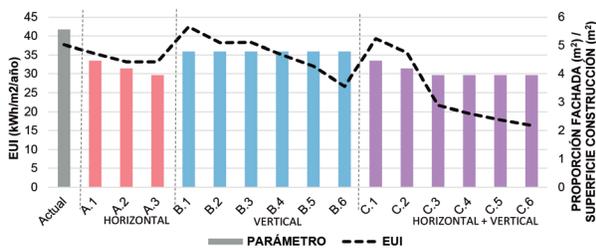
Fuente: elaboración propia.

PARÁMETRO DE COMPACIDAD SUPERFICIE DE FACHADA/ ÁREA DE CONSTRUCCIÓN

La relación con el parámetro de compacidad superficie de fachada/ área de construcción no muestra una relación directa con el comportamiento de consumo en todos los escenarios (gráfica 17). En aquéllos con densificación horizontal la relación es directa, y en aquéllos con densificación vertical, el consumo decrece mientras que el parámetro estudiado se mantiene debido a que no se modifica la compacidad de la volumetría. La gráfica 18 muestra una R2 de 0.50, lo que indica poca relación en los casos.

GRÁFICA 17

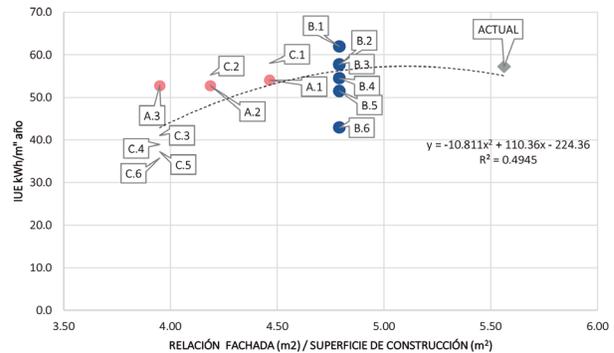
Relación entre IUE y parámetro de proporción de superficie de fachada y superficie de construcción por escenarios de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 18

Línea de tendencia comparativa entre IUE y proporción de superficie de fachada y superficie de construcción de la colonia San Benito



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

En el presente estudio se analiza la Intensidad de uso de la energía de 16 escenarios hipotéticos densificados basados en una muestra de tejido urbano del clima cálido seco. Relaciona dichos resultados con seis parámetros de densidad física: COS, CUS, Vol/Lot, H/w, Fach/Lot y Fach/Const. Al observar los resultados, las muestras coinciden en la reducción del consumo de energía cuando se densifica a partir de cuatro niveles o más. Es decir, una densificación poco intensa puede incluso llevar a un mayor consumo de energía y depender de otras estrategias (materia-lidad, tecnología) para contrarrestarlo.

Dentro del estudio comparativo entre los pa-rámetros morfológicos y la IUE, el valor COS no representa un parámetro proporcional al consumo de energía cuando lo relacionamos a la morfología; al contrario, el valor CUS representa una mayor relación entre la intensidad de consumo energético y la densidad con una R2 = 0.7. Dentro de los parámetros de morfológicos analizados, las proporciones Vol/Lot (R2 = 0.71) y CUS (R2 = 0.71) mostraron una mayor correlación con los datos de Intensidad de uso de energía, por lo que se sugiere, tienen capacidad de ser indicadores de estrategias de disminución de energía a nivel urbano. Mientras que la proporción de aspecto

de cañón urbano H/w y Fach/Const muestran la menor relación con el consumo.

La aplicación en un mayor número de muestras y formatos de densificación, complementarán en gran medida estas conclusiones. Sin embargo, la evaluación a escala de ciudad trae consigo una serie de limitaciones que quizá puedan ser solventadas en líneas futuras de investigación. A continuación se describen algunas de ellas:

- a. Monitoreo del clima. La disposición de datos climatológicos a microescala (según las escalas urbanas climáticas de Stewart y Oke (2012)) para la validación y ajuste de los parámetros en dentro de la herramienta de simulación.
- b. Acceso a la información geográfica y socio-demográfica. En el caso de Hermosillo, el acceso a la información fue a través de la plataforma de acceso público que ofrece el INEGI y publicaciones de asociaciones públicas. Sin embargo, el uso de estas fuentes no es aplicable fuera del país o incluso en otras ciudades.
- c. Faltan especificaciones en la normatividad local cuando se habla de densidad, ya que no se menciona la escala de valor: tejido de barrio, tejido de ciudad, manzana, etc. La variación del factor en estas escalas puede ser relativamente grande.

La propuesta desarrollada de la investigación siempre tuvo en consideración la aplicabilidad en un marco normativo para las ciudades que mejore las condiciones de vida de los habitantes, por lo que esta metodología buscó siempre la mayor simplicidad posible de las variables implicadas. Las aportaciones de los resultados y el proceso metodológico pueden observarse desde diferentes enfoques:

- Sustentar la estrategia de densificación urbana desde una perspectiva energética.
- La metodología y diseño del experimento puede extrapolarse a otros climas y modelos

de crecimiento cuando se desee comparar distintos escenarios a gran escala.

- La metodología logra discernir parámetros morfológicos con una mejor relación con el consumo de energía en el clima cálido-seco.
- Aborda la densificación no sólo desde la perspectiva más estudiada según el estado del arte: movilidad y gestión de recursos. Sino que toma en cuenta el factor climático y las implicaciones que tendrían las distintas posibilidades de reestructuración de la ciudad.
- Normatividad. La forma de trasladar estas conclusiones a un marco normativo será a través de la integración de los parámetros morfológicos con la mejor relación con la IUE, integrando valores mínimos y máximos dentro de los tejidos urbanos en las áreas a densificar.

El modelo establecido logra cuantificar el impacto de la densificación en las muestras de análisis con resultados consistentes de reducción en el consumo para ciertos escenarios y que, además, los parámetros morfológicos elegidos sí tienen una relación con la intensidad de consumo de energía y por lo tanto son considerables para establecer recomendaciones o lineamientos de diseño en la reestructuración de las ciudades. A futuro, integrar nuevas líneas de investigación mejorará el proceso y complementará la observación de los efectos de la densificación. A continuación se presentan algunas de las líneas que surgen a partir de este trabajo:

- Es importante reproducir la aplicación de esta metodología en más estudios de casos en otras ciudades de clima cálido seco. Así como diferentes orientaciones de trama y diseño de edificios. Esto permitirá reforzar los resultados y la comprobación de la hipótesis planteada.
- El uso de los parámetros morfológicos estudiados abre una línea de investigación para el desarrollo de herramientas geoespaciales y de procesamiento de datos que busquen facilitar su cálculo.

- Esta metodología puede aplicarse a otros tipos de clima bajo los mismos objetivos planteados en esta investigación.
- La integración de los resultados a otras metodologías dentro de la valorización de la densificación como estrategia de crecimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Danesa de Energía, y Low Carbon Architecture. (2017). Catálogo de tecnologías. Tecnologías energéticamente eficientes para la envolvente térmica de las edificaciones. Secretaría de Energía-Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Baker, N., y Steemers, K. (1995). *The LT Method 2.0: An Energy Design Tool for Non-domestic Buildings*. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd.
- . (2000). *Energy and Environment in Architecture: A Technical Design Guide*. Londres: Taylor & Francis.
- Batty, M. (2009). Defining Density. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(4): 571 y 572. doi: <https://doi.org/10.1068/b3604ed>.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., y Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1): 180-214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Berghauser Pont, M. Y., y Haupt, P. A. (2007). The relation between urban form and density. *Urban Morphology*, 11(1): 62-65.
- Berghauser Pont, M., y Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, density, and urban form*. Rotterdam: NAI.
- Bruegmann, R. (2005). *Sprawl: A compact history*. Chicago: University of Chicago Press.
- Fernández Per, Aurora. (2007). *Density Projects, 36 nuevos conceptos de vivienda colectiva*. Gráficas Santamaría.
- Forsyth, A., Brennan, C., Escobedo Ruiz, N., y Scott, M. (2016). *Revitalizing Places: Improving Housing and Neighborhoods from Block to Metropolis*. Cambridge, MA: Harvard University Graduate School of Design. Recuperado el 24 de mayo de 2022 de https://research.gsd.harvard.edu/socialhousingmexico/files/2016/09/rp_book_090116_lp_hq.pdf
- Habibi, S., y Asadi, N. (2011). Causes, results and methods of controlling urban sprawl. *Procedia Engineering* (vol. 21, pp. 133-141). Elsevier Ltd. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1996>.
- Hien, W. N., Jusuf, S. K., Samsudin, R., Eliza, A., e Ignatius, M. (2011). A Climatic Responsive Urban Planning Model for High Density City: Singapore's Commercial District. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, pp. 323-330. <https://doi.org/10.5390/susb.2011.2.4.323>
- Hui, S. C. (2001). Low energy building design in high density urban cities. *Renewable Energy*, 24(3-4): 627-640. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00049-0)
- Indovina, F. (2007). *La ciudad de baja densidad. Lógicas, gestión y contención*. (Vol. 1). Barcelona, España: S. A. de Litografía.
- INEGI. (2020a). SCINCE Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado el 20 de mayo de 2022 de <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- . (2020b). *Climatología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Javanroodi, K., Mahdavinjad, M., y Nik, V. M. (2018). Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*, pp. 714-746. doi: 10.1016/J.apenergy.2018.09.116.
- Kämpf, J. H., Montavon, M., Bunyesc, J., Bolliger, R., y Robinson, D. (2010). Optimisation of buildings' solar irradiation availability. *Solar Energy*, pp. 596-603. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.07.013>.
- Lariviere, I., y Lafrance, G. T. (1999). Modelling the electricity consumption of cities: Effect of urban density. *Energy Economics*, núm. 21, pp. 53-66. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(98)00007-3).
- López Ordóñez, C. (2015). *Análisis de la radiación en las calles de Barcelona y de Hermosillo*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- López-Ordóñez, C., Crespo, I., y Roset, J. (2018). Condiciones ambientales del espacio público de ciudades dispersas en clima desértico-cálido. *Proceedings of ISUF-H 2018. Ciudad y formas urbanas: Perspectivas transversales* (pp. 117-128).

- Martin, L., March, L., Bullock, N., Dickens, P., Steadman, P., Echenique, M. C., y Lindsay, W. (1972). *Urban Space and Structures*. (L. Martin, ed.) Cambridge: Cambridge University Press.
- Masmoudi, S., y Mazouz, S. (2004). Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions. *Energy and Buildings*, 36(7): 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.043>
- Mercado, L., y Marincic, I. (2017). Morphology of the urban heat island of Hermosillo, Sonora and the contribution towards a sustainable city. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, pp. 26-33.
- Moreno, G., y Steadman, P. (2014). The relationship between density, built form and design. En: P. M. Carmona, *Explorations in Urban Design: An Urban Design Research Primer* (p. 193). California, Estados Unidos: Ashgate Publishing, Ltd.
- Naciones Unidas. (2020, 17 de junio). Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. Recuperado el 28 de febrero de 2021 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- . (2021). Naciones Unidas. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Nevado García, E. (2019). Termografía del cañón urbano: Uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Olgay, V. (1967). Bioclimatic orientation method for buildings. *International Journal of Biometeorology*, pp. 163-174.
- Olgay, V., y Olgay, A. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism: Some chapters based on cooperative research with Aladar Olgay*. Princeton University Press.
- Ratti, C., Baker, N., y Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7): 762-776. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>.
- Riera Pérez, M. G., y Rey, E. (2013). A multi-criteria approach to compare urban renewal scenarios for an existing neighborhood. Case study in Lausanne (Switzerland). *Building and Environment*, núm. 65, pp. 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.017>
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., y Schofield, J. (2014). Cities and Energy: Urban Morphology and Residential Heat-Energy Demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, pp. 138-162. <https://doi.org/10.1080/b39065>
- Salazar, J. (2001). Expansión o densificación? Reflexiones en torno al caso Bogotá. *Revista Bitácora Urbano-Territorial*, pp. 21-35.
- Salvati, A., Coch, H., y Morganti, M. (2017). Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. *Energy Procedia*, pp. 499-504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07>.
- Salvati, A., Palme, M., Chiesa, y Kolokotroni, M. (2020). Built form, urban climate and building energy modelling: Case-studies in Rome and Antofagasta. *Journal of Building Performance Simulation*, pp. 2255-2262. <https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1707876>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., y Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3-4): 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Steadman, P. (1977). Energy and Patterns of Land Use. *JAE*, 30(3): 62-67. <https://doi.org/10.2307/1424311>
- Steemers, K. (2003). Energy and the city: Density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, núm. 35, pp. 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0)
- Stewart, I. D., y Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>
- Strømman-Andersen, J., y Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8): 2011-2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.007>
- Vaggione, P. (2014). *Planeamiento urbano para autoridades locales*. Bogotá: UN-Habitat.
- Zapatero Santos, M. A. (2017). *La densidad urbana: Concepto y metodología*. Madrid. <https://oa.upm.es/45491/>