



AHORROS EN LOS CONSUMOS PARA ENFRIAMIENTO DE ESPACIOS INTERIORES MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICIOS RESIDENCIALES EN ALTURA. EL CASO DE LA "CIUDAD-OASIS" DE MENDOZA, ARGENTINA.

Artículo
Recibido 04-04-2016
Aceptado 15-05-2016

ENERGY SAVINGS FOR THE COOLING OF INDOOR SPACES THROUGH THE EVALUATION OF SOLAR CONTROL SYSTEMS IN HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS: THE CASE OF THE OASIS CITY OF MENDOZA, ARGENTINA.

JULIETA BALTER

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mendoza, Argentina
jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

CARLOS DISCOLI

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)/Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Buenos Aires, Argentina
discoli@rocketmail.com

CAROLINA GANEM

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mendoza, Argentina
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El presente trabajo estudia el comportamiento térmico y energético de edificios residenciales en altura, en el contexto particular de una "ciudad-oasis". Se plantea como objetivo la definición de sistemas de control solar adecuados en la envolvente para cada tipología material de edificio -másica y liviana- y para cada estrato en altura de las viviendas: debajo y sobre de la copa de los árboles. El monitoreo de viviendas en uso permite validar modelos geométricos (software Energy Plus) y simular propuestas de aplicación de elementos de protección solar. Se analizan los ahorros en los consumos para enfriamiento en departamentos en niveles bajos, medios y altos. Los resultados muestran que en el edificio másico, en las viviendas ubicadas debajo de la copa de los árboles, es posible anular las cargas energéticas para enfriamiento mediante el uso de elementos exteriores de protección solar. Mientras que en las viviendas sobre la copa de los árboles, los ahorros energéticos se encuentran entre el 32% y 42%. En el edificio liviano, la aplicación de sistemas de control en departamentos bajo la copa de los árboles alcanza ahorros del orden del 53% y en las viviendas sobre la copa, las reducciones energéticas se encuentran entre el 46% y 54%. Las dimensiones adecuadas de tales elementos pueden generar propuestas posibles de ser transferidas a las normativas locales de edificación.

Palabras clave

arquitectura ambiental, ahorro, protección, edificios en altura

ABSTRACT

This article analyzes the thermal and energy performance of high-rise residential buildings in the specific context of an oasis city. The aim of the study is to define adequate solar control systems in the envelope for each building material typology –heavyweight and lightweight– for two different housing height levels: above and below the tree canopy. By monitoring occupied dwellings, dynamic models were validated with Energy Plus software and proposed alternatives for solar protection were simulated. Energy savings for cooling were analyzed in apartments at low, middle and high levels. Results show that in the heavyweight building, the dwellings below the tree canopy do not require HVAC energy consumption to reach thermal comfort zones when exterior shading devices are used. While in units above the tree canopy, energy savings range from 32% to 42%. In the case of the lightweight building, apartments below the tree canopy present energy savings of approximately 53% and in those above the tree canopy savings are between 46% and 54%. The suitable dimensions of such elements constitute possible proposals for inclusion in local building regulations.

Keywords

environmental architecture, savings, protection, high-rise buildings

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, muchos de los países en vías de desarrollo se caracterizan por la renovación de sus centros urbanos mediante la construcción de edificios en altura en las áreas consolidadas de las ciudades. Los nuevos edificios orientan su rol principalmente a la imagen, empobreciéndose en sus otras características relacionadas con el logro del confort interior y la eficiencia energética. Esta tendencia se manifiesta en el debilitamiento y simplificación de la envolvente a través del incremento del uso del vidrio (Oldfield, Trabucco y Wood, 2009), lo cual conduce a una mayor complejidad y dependencia de los sistemas de control ambiental. En la provincia de Mendoza, Argentina, los usuarios residenciales fueron los responsables de la variación de casi dos terceras partes (63%) de la variación total de la demanda de energía eléctrica en todo el 2013. Estos usuarios incrementaron su participación hasta el 28,3% de la demanda total anual, teniendo en cuenta que históricamente su participación promedió el 20%. Una de las causas de estos incrementos podría ser las temperaturas extremas registradas durante el año 2013, calificadas como las más altas de los últimos 50 años (EPRE Mendoza, 2013). En tal contexto, distintos autores a nivel nacional han evaluado los consumos energéticos, el comportamiento térmico y las condiciones de confort en el ámbito edilicio. En 2006, se expuso un modelo de ahorro de energía en refrigeración desarrollado para edificios de habitación humana, junto a indicadores de eficiencia y sus valores admisibles aplicables a tres tipos de edificios de vivienda (Czajkowski y Corredera, 2006). En cuanto al confort de los usuarios, se analizó mediante medición y simulación un edificio de oficinas con doble fachada vidriada. Los resultados muestran un importante sobrecalentamiento en verano, para lo cual se proponen como soluciones fachadas verdes, ventilación natural y el uso del aire proveniente de los subsuelos para enfriamiento de la masa térmica del edificio (Flores Larsen, 2010). Por otra parte, mediante la evaluación del comportamiento térmico de verano de 4 viviendas másicas y compactas ubicadas en zonas urbanas de baja densidad, se obtienen estrategias de mejoramiento con las que se permitiría optimizar las condiciones de confort con ahorro de energía (Filippín y Flores Larsen, 2010).

Asimismo, los edificios residenciales presentan requisitos térmicos con un mayor grado de adaptación y flexibilidad que otro tipo de edificios, debido a la variabilidad de uso y costumbres de sus habitantes (Juodis, Jaraminiene y Dudkiewicz, 2009). La energía requerida para refrigeración es el rubro de mayor importancia en la demanda energética de viviendas en verano. En consecuencia, los ocupantes tienen importantes implicancias en las temperaturas interiores y en los requerimientos de energía (Toftum, Andersen y Jensen, 2009). Por tal motivo, es necesaria una consciencia activa instalada frente a estrategias de acondicionamiento pasivas. En este sentido, el uso apropiado de sistemas de control solar puede no sólo mejorar el confort interior, sino también reducir los consumos para enfriamiento.

Diversos trabajos a nivel internacional han evaluado la aplicación de sistemas de control solar en la envolvente edilicia. En particular, el de Cho, Yoo y Kim (2014) logra, mediante simulación energética, ahorros potenciales para enfriamiento del orden del 20%. La reducción de la ganancia solar directa con dos elementos de protección en el exterior podría disminuir la demanda energética un 19.7%, con elementos horizontales (voladizos) y un 17.3% con paneles verticales. Asimismo, análisis bajo diferentes condiciones climáticas muestran cómo la integración de dispositivos de persianas puede mejorar las condiciones ambientales interiores y obtener reducciones energéticas significativas respecto a un edificio sin protecciones (Palmero-Marrero y Oliveira, 2010). Otro estudio, enfocado en la localización, dimensiones y colores óptimos de los elementos de control, obtiene ahorros para enfriamiento del orden del 14% durante un día de verano con alta radiación (Gratia y De Herde, 2007). Sin embargo, las investigaciones sobre el tema se enfocan fundamentalmente en edificios de oficinas, de modo que existen escasas investigaciones orientadas a sistemas de control aplicados a edificios residenciales en altura.

Por otro lado, las medidas a tomar en relación a tales elementos de control tienen dependencia directa con la ubicación geográfica y las condiciones climáticas del contexto. Al respecto, las "ciudades-oasis" insertas en climas áridos, cuentan con beneficios ambientales provocados por la forestación urbana y definen dos estratos: por un lado, la situación bajo la copa de los árboles beneficia a las edificaciones de baja altura (3 - 4 niveles), en verano, ya que la radiación incidente es moderada e incluso puede ser bloqueada, dependiendo de la densidad del follaje (Cantón *et al.*, 2003). Por otro lado, fuera del estrato acondicionado, las edificaciones están expuestas directamente al clima de la región: la condición sobre la copa de los árboles consiente un acceso pleno a la radiación, tanto en invierno (energía incidente deseada) como en verano (energía incidente no deseada), y una exposición al intercambio convectivo y radiativo de energías en ambas estaciones. Es así que este modelo de ciudad presenta un micro-clima que beneficia a las edificaciones de baja altura, atenuado la condicionante climática árida propia de la región. A pesar de tal diferenciación en el micro-clima, los edificios en altura tienden a lograr una imagen continua en toda su fachada, sin tener en cuenta los factores ambientales del entorno.

La ciudad en estudio, Mendoza (32° 40' LS, 68° 51' LO), se ubica en una zona semi-desértica y árida y cuenta con un clima templado continental. Se concibe como una "ciudad-oasis" a partir de la coordinación de diferentes factores: la estructura urbana en damero (trama ortogonal de manzanas), la edificación, la forestación (trama de árboles que acompaña el trazado urbano) y un sistema de riego (acequias) que bordea el perímetro de las manzanas. Estos factores resultan en un estrato acondicionado o sector de la atmósfera beneficiado ambientalmente por los efectos de la arboleda y el agua. Es así que este modelo de ciudad ha atenuado la condicionante climática árida propia de la región (Bórmida, 1984).

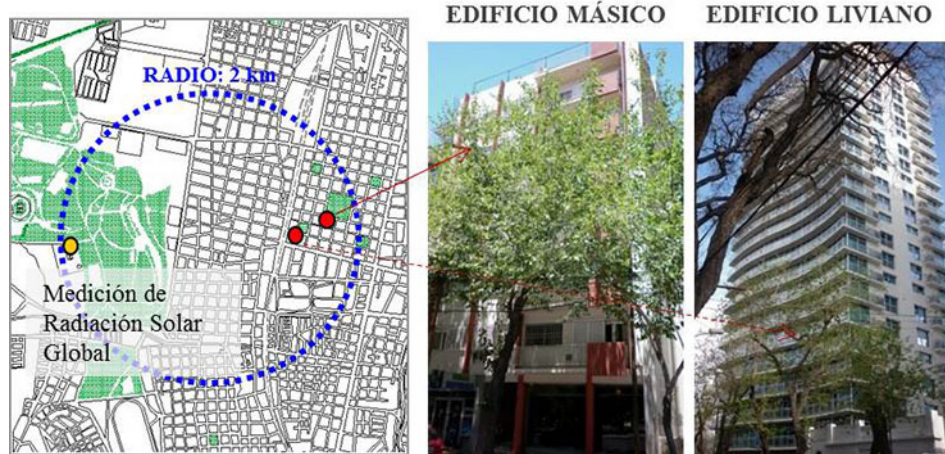


Figura 1. Ubicación y fotografías de los edificios en estudio. Fuente: Elaboración de los autores).

Mediante el análisis del comportamiento energético y su relación con el confort térmico interior en edificios en altura residenciales en la ciudad de Mendoza, se comprobó la necesidad de atender la situación expuesta en la envolvente de las construcciones que superan el estrato forestal. Resulta substancial que los edificios en altura aprovechen los beneficios de la forestación en la ciudad, diferenciando la envolvente de los niveles inferiores (basamento) y superiores (torre) (Balter, 2015). Por consiguiente, el presente trabajo se enfoca en la evaluación de los ahorros energéticos para enfriamiento mediante la utilización de sistemas de control solar, en edificios en altura con diferente materialidad de envolvente: másica y liviana. Con tal fin, se evalúan unidades de vivienda en niveles bajos (debajo de la copa de los árboles), niveles medios y altos (sobre la copa de los árboles). Se plantea como objetivo la definición de sistemas de control solar adecuados para cada tipología material de edificio y para cada estrato de altura. Las dimensiones adecuadas de dichos elementos pueden generar propuestas posibles de ser transferidas a las normativas locales de edificación.

CASOS DE ESTUDIO.

CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN.

Para la labor propuesta, se seleccionan dos edificios residenciales de uso permanente, a partir de la siguiente clasificación de dos tipologías de materialidad edilicia:

Edificios másicos: construcciones con un mínimo del 70% de materiales opacos en el total de la envolvente expuesta y más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico mayor o igual a $1200\text{kg}/\text{m}^3$, y peso por metro cuadrado mayor o igual a $100\text{kg}/\text{m}^2$.

Edificios livianos: construcciones con un mínimo del 50% de materiales transparentes en el total de la envolvente expuesta y más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico menor a $1200\text{kg}/\text{m}^3$, y peso por metro cuadrado menor a $100\text{kg}/\text{m}^2$.

En cuanto al área de estudio, se abarcó la zona de mayor densidad edilicia en altura, mayormente residencial, con una densidad poblacional alta, estimándose más de 800 hab/ha. Asimismo, con el propósito de estimar la condición más favorable desde el punto de vista bioclimático (en el Hemisferio Sur), se evaluaron casos cuya fachada principal se encontrara orientada al Norte. Ambos edificios (Figura 1) se ubican frente a dos de las plazas principales de la ciudad, sobre canales viales de 20m de ancho, forestados, con moreras adultas. En cada edificio se auditaron dos departamentos frontales (4 casos en total), localizados uno debajo y otro sobre la copa de los árboles.

DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS.

El edificio másico cuenta con un 73% de materiales opacos en su envolvente y la resistencia térmica media de envolvente total es de $0,49\text{m}^2\text{C}/\text{W}$. La materialidad del edificio es de ladrillos cerámicos huecos de 0,30m de espesor, con revoque y pintura al exterior, sin aislación ($U=1,36\text{W}/\text{m}^2\text{C}$), y las divisiones interiores son del mismo material de 0,10m de espesor ($U=1,97\text{W}/\text{m}^2\text{C}$). Las cubiertas son de losa nervada con ladrillo hueco y aislación ($U=0,24\text{W}/\text{m}^2\text{C}$). Los vidrios son simples de 4mm de espesor ($U=5,8\text{W}/\text{m}^2\text{C}$, factor solar = 0,87). En cuanto a elementos de protección solar, cuenta con balcones de 1,20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco.



Figura 2. Plantas de los departamentos en estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

El edificio liviano responde a la concepción de edificio de estructura de hormigón y piel de vidrio, y si bien la estructura resulta significativa debido al carácter sísmico de la región, predomina una estética transparente. El 48% de la envolvente exterior es opaca de muros de hormigón armado con revoque texturado con base de polímero. Sin embargo, el 22% de ese porcentaje está recubierto en vidrio (por motivos estéticos) lo cual varía mínimamente el coeficiente de transmitancia térmica (con vidrio $U=2.55W/m^2 \text{ } ^\circ C$ y sin vidrio $U=2.54W/m^2$). El total de materiales transparentes en la envolvente es del 76% y la resistencia térmica media de envolvente total es de $0,26m^2 \text{ } ^\circ C/W$. En el interior las divisiones son livianas, de tabiques de cartón y yeso tipo Durlock, de 10 cm de espesor ($U= 5,70W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Las losas son de $H^\circ A^\circ$ ($U=2,40W/m^2 \text{ } ^\circ C$) y los vidrios son vidrios laminados de 6 mm (3+3) ($U= 5,7W/m^2 \text{ } ^\circ C$ factor solar=0,07), con láminas de polivinil butiral (PVB) de 0,38 con tramos incoloros, *artic-blue* y espejados. El edificio dispone de balcones de 1m de profundidad y ningún tipo de elementos de protección solar en la envolvente.

En la Figura 2 se presentan las unidades de vivienda monitoreadas. En el edificio másico cuentan con una superficie cubierta de $122.5m^2$ y semi-cubierta (balcón) de $5,50m^2$ y se ubican en el primer y quinto nivel. En el edificio liviano las viviendas tienen una superficie cubierta de $98m^2$ y semi-cubierta (balcón) de $17m^2$ y se ubican en los niveles tercero y dieciséis. El análisis de forma de las dos viviendas en estudio se define a partir de dos factores: Factor de Forma: FF (Olgyay, 1998) y Factor de Área de Envolvente de Piso: FAEP (Esteves y Gelardi, 2003). Los resultados muestran que ambas cuentan con similares factores: en las viviendas másicas, $FF=1$ y $FAEP=0.60$ y en las viviendas livianas, $FF=1.20$ y $FAEP=0.50$, lo cual indica equivalentes grados de compacidad.

METODOLOGÍA.

MONITOREO Y VALIDACIÓN DE MODELOS GEOMÉTRICOS.

La metodología utilizada para el monitoreo de las viviendas y la validación de los modelos geométricos (Balter, Ganem y Discoli, 2016) se ha llevado a cabo mediante los siguientes procesos:

a) Auditorías térmicas de cuatro unidades de vivienda: dos departamentos equivalentes en su diseño por cada edificio seleccionado (másico y liviano) ubicados en distintas alturas (bajo y sobre la copa de los árboles). En todos los casos, los departamentos auditados presentan las mismas características de colindancia con otros edificios y son unidades rodeadas, a su vez, por otras unidades tanto por arriba como por abajo. Se excluyen de los casos de estudio los departamentos cuya cubierta se encuentra expuesta al exterior. Por este motivo, las unidades de vivienda estudiadas sólo presentan relación directa con el microclima interior en las fachadas. Las auditorías *in situ* se realizaron simultáneamente en las cuatro viviendas y en las cuatro estaciones del año, durante períodos entre veinte y treinta días. Se instalaron en cada caso 3 micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura del aire y humedad relativa, ubicados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón). Este último, protegido de la posible incidencia de la radiación solar. Se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, de acuerdo con el protocolo establecido por Longobardi y Hancock (2000). Las mediciones de radiación solar global se realizaron dentro de un radio de 2km con un solarímetro CM 5 KIPP & ZONEN en los mismos períodos y con la misma frecuencia de toma de datos establecida para las mediciones de temperatura de aire y humedad.

b) Entrevistas abiertas a los habitantes de los departamentos en estudio. El objetivo de esta técnica fue conocer el uso y ocupación de los espacios: horarios, gestión de la envolvente, uso de medios mecánicos de climatización, etc.

c) Validación de modelos geométricos de simulación dinámica: los edificios, en su totalidad, fueron definidos mediante el programa Open Studio Plug-in para Google Sketch Up Versión 8, a partir del cual se ingresaron los datos en el software Energy Plus (2013). Las viviendas en estudio se graficaron en la altura real en la que se encuentran, y en las condiciones reales de colindancia entre edificios y entre unidades descriptas en el punto a.

Con la medición de las variables climáticas, se conformaron dos archivos (climáticos): uno, para la condición dada sobre la copa de los árboles, que contiene las mediciones realizadas de temperaturas y radiación solar global; y otro, en el cual se modifica la radiación incidente bajo la arboleda urbana. Para ello, se tienen en cuenta los estudios realizados sobre el grado de permeabilidad de árboles en ciudades del centro oeste de Argentina (Cantón *et al.*, 2003). Dicha permeabilidad a la radiación global al mediodía solar correspondiente a la arboleda urbana existente en el caso de estudio (*Morus Alba*), es del 31,4% en verano y del 66,4% en invierno. Estos datos se corroboraron mediante la auditoría de la radiación solar en los espacios exteriores de los departamentos en estudio con un sensor Lutron SPM-116SD, en días y horarios seleccionados durante todo el período de medición. Los datos necesarios para el archivo de clima requerido para la simulación fueron: radiación global sobre superficie horizontal; radiación difusa sobre superficie horizontal; radiación directa normal al haz; temperatura de bulbo seco exterior; humedad relativa exterior; velocidad y dirección de vientos.

Una vez ajustadas las temperaturas medidas y simuladas, se aislaron las incidencias de los usuarios, considerando las viviendas desocupadas y sin ganancias internas por personas.

d) Categorización de edificios. Respecto a las variables morfológicas, los edificios en altura en Mendoza se pueden clasificar en tres tipologías de acuerdo al código de edificación (Municipalidad de Mendoza, 2000). El edificio másico responde a la tipología de "Torre sin retiros", es decir, construcciones de hasta 10 niveles de altura, desarrolladas sobre los límites del terreno. Mientras que el edificio liviano corresponde a "Torre retirada de las líneas divisorias de edificación", tipología referida a construcciones con retiros de los límites del terreno en todo su perímetro. Para trabajar con tipologías morfológicas equivalentes se unificaron los edificios en estudio en la tercera tipología existente de "Basamento y Torre": el Basamento es una construcción que puede desarrollarse hasta los límites del terreno (sin retiros) con una altura máxima de 10m. Por sobre el mismo se permite la construcción de la torre

con retiros mínimos obligatorios. Esta tipología aprovecha los beneficios micro-climáticos que aporta la copa de los árboles en los primeros niveles (hasta los 10m de altura). Asimismo, en el basamento, las envolventes laterales -Este y Oeste- se encuentran protegidas de la exposición al clima exterior por las edificaciones colindantes existentes de más de dos niveles de altura. Por esto se modificaron las condiciones de dichas envolventes, considerándolas superficies adiabáticas.

e) En cuanto a las variables de materialidad, con el objetivo de mejorar el comportamiento térmico y energético de las viviendas estudiadas se evaluaron diferentes alternativas, modificando los componentes de la envolvente vertical de los edificios en estudio. Esto se realiza en función de identificar las combinaciones de los elementos opacos y transparentes con mejores resultados. En el caso másico, la materialidad opaca seleccionada es ladrillo macizo de 0.30m con aislación exterior de 0.05m de poliuretano expandido ($U=0.63W/m^2$). En el edificio liviano se mantuvo la envolvente opaca de hormigón armado (estructura). Respecto a la envolvente transparente, en ambos edificios se trabajó con DVH 6+12+6 ($K=1.80 W/m^2C$, $FS=0.35$).

APLICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL SOLAR.

Con el fin de clasificar las protecciones se toman dos de las categorías planteadas por Baker y Fanchiotti (1993) en relación a los elementos rígidos y flexibles. Se distinguen elementos horizontales, verticales o una combinación de ambos.

Los elementos rígidos, tales como balcones, parasoles y celosías, se refieren a dispositivos opacos horizontales y/o verticales que redirigen y/u obstruyen la radiación solar directa. Normalmente, son estructuras fijas que no pueden ser reguladas. En aras de comprender los intervalos de protección o sombreado y determinar las longitudes apropiadas, se analizó la inclinación de los rayos solares normales a la fachada para la ciudad de Mendoza, en las horas críticas diurnas (de 12pm a 3pm), y en relación a la variabilidad de dimensiones de los balcones y parasoles. En la Figura 3 se presentan los esquemas de la incidencia solar con protecciones horizontales: balcones de 1m de profundidad (casos existentes) y de 2,50m de profundidad (longitud óptima determinada).

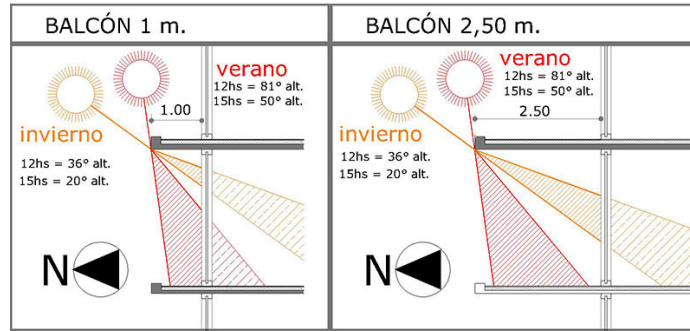


Figura 3. Incidencia solar en fachadas para la ciudad de Mendoza. Fuente: Elaboración de los autores.

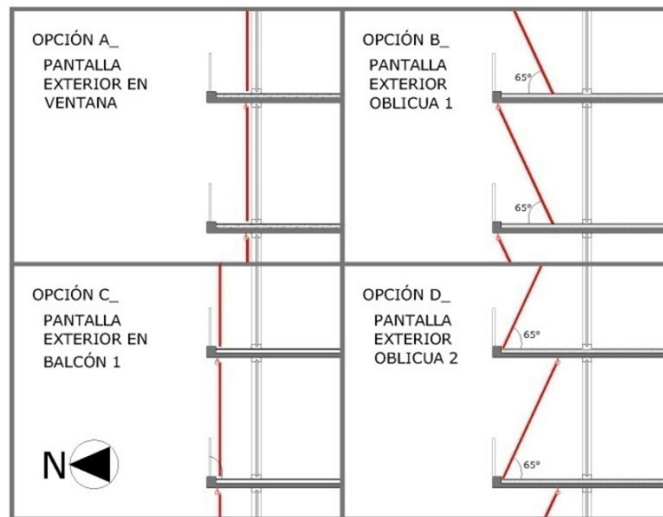


Figura 4. Opciones de posiciones de pantallas flexibles analizadas Fuente: Elaboración de los autores.

	EDIFICIOS MÁSICOS	EDIFICIOS LIVIANOS
ELEMENTOS HORIZONTALES RÍGIDOS	BALCONES (2.5m) 	BALCONES (2.5m)
	PARASOLES (1m) 	CELOSÍAS
ELEMENTOS VERTICALES O/Y HORIZONTALES RÍGIDOS		
	PANTALLAS 	PANTALLAS

Figura 5. Elementos de protección solar compatibles con la expresión arquitectónica. Fuente: Elaboración de los autores.

		Bajo la copa °C	Sobre la copa °C	
		Niveles bajos (2° nivel)	Niveles medios (5° nivel)	Niveles altos (16° nivel)
Temperatura Media	Exterior	28	27.8	
	Edificio másico	24.2	26.6	29
	Edificio liviano	27.1	28.7	31
ΔT diario (diferencia diurna-nocturna)	Exterior	8.2	10.5	
	Edificio másico	0.9	1.2	1.4
	Edificio liviano	1.3	1.7	3.3

Tabla 1. Temperaturas medias y ΔT diarios exteriores e interiores en verano. Fuente: Elaboración de los autores.

Los elementos flexibles, como pantallas, se refieren a dispositivos que obstruyen parcial o totalmente la luz solar directa y difusa. Pueden abrirse o cerrarse permitiendo ventilación natural y también controlar las vistas. Con el fin de determinar la mejor opción en relación al grado de protección solar, se simulan diferentes alternativas de ubicación y posición de las pantallas flexibles aplicadas en edificios en altura. En la Figura 4 se presentan los esquemas de las distintas alternativas: A) pantalla exterior en ventana; B) pantalla exterior oblicua 1; C) pantalla exterior en balcón; y D) pantalla exterior oblicua 2. Los resultados indican un mejor comportamiento térmico con el caso C, con diferencias menores: de 0,1°C respecto a los otros casos.

En la Figura 5 se muestran imágenes de los elementos a evaluar: protecciones compatibles con la tipología arquitectónica. Los elementos verticales rígidos se diferencian según la materialidad del edificio: para los edificios másicos se incorporan parasoles de 1m de profundidad y para los livianos, celosías de 1.5m de altura separadas 30cm de la fachada, con cierto grado de transparencia dada la compatibilidad en la expresión arquitectónica (los parasoles le quitarían a este tipo de edificios la imagen liviana y transparente deseada).

Una vez determinadas los elementos de control para cada caso, se aplican en ambos edificios. Se simulan los consumos energéticos en verano, teniendo en cuenta una temperatura constante de 25°C mediante la aplicación de elementos rígidos y flexibles materializados con los dispositivos de sombra (*Building Shading*) del programa *Energy Plus*. Los elementos flexibles se consideran en las horas diurnas de mayor incidencia de radiación directa (de 11am a 18pm). Asimismo, se calculan las reducciones energéticas en términos porcentuales diferenciando el basamento y los niveles en altura en la torre. Se analizan los resultados en departamentos ubicados en los siguientes

niveles:

Debajo de la copa de los árboles –Basamento: 2° nivel (nivel bajo).

Sobre la copa de los árboles –Torre: 5° nivel (nivel medio) y nivel 16° (nivel alto).

RESULTADOS.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO-ENERGÉTICO SIN LA INCIDENCIA DE LOS USUARIOS.

Se presentan los resultados de verano (Tabla 1) de las temperaturas medias y las diferencias térmicas (ΔT) diurnas-nocturnas diarias promedio, considerando las temperaturas exteriores medidas y las interiores simuladas sin la incidencia de los usuarios.

Se analizan las temperaturas interiores simuladas resultantes del promedio de los espacios orientados al Norte en ambos edificios (estar y habitaciones 1 y 2).

En el edificio másico, el departamento debajo de la copa de los árboles cuenta con las temperaturas más bajas, dentro del rango de confort, entre 23.8°C y 24.7°C. Sobre la copa de los árboles, en el 5° nivel, las temperaturas se encuentran entre 26°C y 27.2°C; y en el nivel 16 las temperaturas sobrepasan el rango de confort, entre 28.3°C y 29.7°C.

En el edificio liviano las temperaturas más bajas también corresponden al departamento debajo de la copa de los árboles, encontrándose dentro del rango de confort¹, entre 26.5°C y 27.8°C. Sobre la copa de los árboles, las temperaturas interiores sobrepasan el confort: en el 5° nivel se encuentran entre 27.9°C y 29.9°C y en el nivel 16, entre 30.2°C y 33.5°C.

[1] Givoni (1992) sugiere rangos de temperatura, en condiciones de aire calmo, entre 20°C-27°C para el 80% de personas en confort. Para países en vías de desarrollo, el autor sugiere la flexibilización de 2°C de las temperaturas límite debido a que el habitante se encuentra adaptado a su clima. El presente trabajo adopta un rango de confort entre 18°C y 28°C, teniendo en cuenta las estaciones de verano e invierno.

		Bajo de la copa	Sobre la copa	
		Niveles bajos (2° nivel)	Niveles medio (5° nivel)	Niveles altos (16° nivel)
		kWh/m ²		
Edificio másico	Sin protección	0.1	1.2	2.2
	Balcones	0	0.9	1.9
	Parasoles	0	0.8	1.8
	Balcones y pantallas flexibles	0	0.8	1.8
	Parasoles y pantallas flexibles	0	0.7	1.5
Edificio liviano	Sin protección	1.4	4.1	3.5
	Balcones	0.7	2.8	2.6
	Celosías	1.2	3.5	3
	Balcones y pantallas flexibles	0.65	1.9	1.9

Tabla 2. Consumos mensuales por metro cuadrado (kWh/m²) para enfriamiento en verano.
 Fuente: Elaboración de los autores"

Los resultados simulados de verano demuestran que en ambos edificios las viviendas del basamento cuentan con temperaturas menores y más cercanas a los rangos de confort. Esto se debe, por un lado, al mayor porcentaje de envolvente expuesta en las viviendas superiores y, por otro, a la influencia micro-climática del estrato acondicionado propio de la "ciudad-oasis", el cual beneficia a las viviendas ubicadas bajo su protección moderando la radiación incidente y, por ende, las temperaturas interiores.

Asimismo, el edificio másico cuenta con mejores condiciones térmicas, con diferencias de 2°C a 3°C, gracias a la opacidad de la envolvente y a los elementos de protección que controlan la incidencia de radiación solar y a su inercia térmica entre el ciclo nocturno y diurno. En cuanto al caso liviano, la envolvente del edificio (columnas de hormigón armado recubiertas en vidrio laminado de 6mm), con un 72% de superficie transparente, y la carencia de dispositivos de control ofrecen muy pocas posibilidades de amortiguamiento a las condiciones extremas exteriores.

APLICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL: CONSUMOS ENERGÉTICOS PARA ENFRIAMIENTO.

En la Tabla 2 se presentan los resultados simulados de los requerimientos energéticos para enfriamiento. Se analizan los casos sin ningún tipo de protección solar en relación a los casos en los que se aplican elementos rígidos y su combinación con elementos flexibles.

En el caso másico, la unidad de vivienda debajo de la copa de los árboles con elementos de control solar no requiere de energía auxiliar para encontrarse dentro de rangos de confort (25°C). Esto demuestra los beneficios en los consumos energéticos para enfriamiento proporcionados por la moderación de la radiación incidente, dada por la arboleda urbana, junto a adecuados elementos de protección solar en la envolvente. Mientras que en los departamentos sobre la copa de los árboles, los requerimientos energéticos son mayores en el nivel

superior. La combinación de elementos rígidos y flexibles presentan los siguientes ahorros para enfriamiento: con balcones y pantallas flexibles, del orden del 33% (0.8kWh/m²) en el 5° nivel, y en el nivel 16, del 18% (1.8kWh/m²). Mientras que con parasoles y pantallas flexibles, los ahorros en el 5° nivel son del orden del 42% (0.7kWh/m²) y en el nivel 16, del 32% (1.5kWh/m²).

En el edificio liviano, a diferencia del caso másico, el departamento debajo de la copa de los árboles con elementos de control sí requiere energía auxiliar para ubicarse dentro de rangos de confort. Los ahorros energéticos con celosías resultan similares en todos los niveles estudiados: debajo de la copa de los árboles, son del orden del 14% (1.2kWh/m²); y sobre la copa, en el 5° nivel, del 15% (3.5kWh/m²) y en el nivel 16, del 14% (3kWh/m²). La combinación de balcones y pantallas flexibles muestran las mayores reducciones energéticas: debajo de la copa, del 53% (0.65kWh/m²); mientras que sobre la copa, el ahorro es del 54% (1.9kWh/m²) en el 5° nivel, y en el nivel 16, del 46% (1.9kWh/m²).

Se puede observar que en el edificio másico, en todos los casos analizados (con y sin protecciones), los mayores consumos están dados en el nivel más alto y disminuyen a medida que se desciende de nivel. Mientras que en el edificio liviano los consumos de los casos sin protección y con balcones y celosías son mayores en el nivel medio. Esto se debe a que con la altitud, en la simulación por *Energy Plus*, se consideran modificaciones en los parámetros de temperatura, velocidad de vientos y coeficientes convectivos, generando una mayor disipación térmica de las envolventes livianas con estas características. Sin embargo, se puede advertir que mediante la aplicación de balcones y pantallas flexibles las diferencias entre los niveles medio y alto se equiparan.

CONCLUSIONES Y PAUTAS.

A partir de los resultados térmicos y energéticos obtenidos, podemos resaltar dos aspectos significativos: por un lado, resulta importante priorizar la tipología de "Basamento y Torre" en los edificios en altura, en la ciudad de Mendoza. El basamento edilicio resulta una estrategia contundente desde el punto de vista ambiental, dado que las unidades de vivienda aprovechan la protección a la radiación incidente y cuentan con temperaturas más bajas en verano. En consecuencia, la necesidad de contar con medios mecánicos de climatización disminuye.

Por otro lado, en relación a la comparación de los dos edificios sin elementos de protección, se observa que, si bien el edificio liviano requiere mayor energía auxiliar para enfriamiento en todos los niveles, las diferencias en los consumos disminuyen a medida que aumenta la altura de las viviendas. Las diferencias en los departamentos debajo de la copa de los árboles son del orden del 92%, mientras que sobre la copa, en el 5° nivel, resultan del 71%, y en el nivel 16 del 37%. Esta situación evidencia la importancia de la materialidad de la envolvente en la torre debido al rol de ésta como moderadora de las temperaturas interiores. Resultan imprescindibles materialidades que prevean aislaciones en las superficies verticales, así como tecnologías transparentes eficientes. Si la envolvente es adecuada en sus aspectos constructivos y tecnológicos, las posibilidades de manejo por parte de los usuarios pueden potenciar su calidad.

En cuanto a los sistemas de control solar, en el edificio másico, en las viviendas ubicadas debajo de la copa de los árboles, es posible anular las cargas energéticas para enfriamiento mediante el uso de elementos exteriores de protección solar. Asimismo, la mayor eficiencia energética se presenta mediante el uso de elementos rígidos verticales y horizontales (parasoles de 1m) combinados con pantallas verticales flexibles. Mientras que en el edificio liviano, los menores consumos se dan con elementos rígidos horizontales (balcones de 2.5m) combinados con pantallas flexibles. De acuerdo a estos resultados, se sugieren las siguientes recomendaciones como estrategias de control:

En edificios másicos, los elementos de control debieran diferenciarse en sus dimensiones en el basamento (debajo de la copa de los árboles) y la torre (sobre la copa de los árboles). En el basamento, los elementos rígidos en la envolvente, como por ejemplo aleros o balcones, pueden presentar una profundidad del orden de 1m (considerando una altura estándar). Asimismo, si no se contara con elementos de control en la envolvente, la protección solar

que brinda la copa de los árboles (moreras de 12m de alto) puede resultar suficiente para controlar las temperaturas interiores y alcanzar rangos de confort (hasta 28°C), sin la necesidad del uso de medios mecánicos de climatización, siempre y cuando el edificio disponga de las condiciones físicas mínimas de materialidad acordes al contexto. En la torre, resulta importante moderar la radiación incidente mediante el uso de protecciones horizontales, que en este caso deberían tener una profundidad de entre 2m y 2,50m. En edificios livianos, en función de respetar la imagen transparente deseada, se sugieren protecciones solares translúcidas o semi-opacas como es el caso de lamas serigrafiadas o celosías. Para edificios con baja inercia térmica en su envolvente y más del 50% de superficie transparente en la fachada, resulta esencial que el proyecto incluya protecciones rígidas y flexibles en cada uno de sus aventanamientos. Los elementos horizontales debieran tener una profundidad mínima de 2.5m tanto en el basamento como en la torre.

Se considera que uno de los aportes principales de la presente investigación se encuentra en la posibilidad de transferencia a las normativas edilicias. Si bien el Código de Edificación de Mendoza carece de algún apartado sobre eficiencia energética, las normas argentinas IRAM establecen condiciones de acondicionamiento térmico exigibles en la construcción de los edificios. Específicamente, la norma IRAM 11605 (IRAM, 1996) otorga tres niveles de transmitancia que corresponden a distintos niveles de calidad térmica en los paramentos verticales y cubiertas. No obstante, dichas normas son de aplicación electiva en Mendoza y los edificios en altura en la ciudad difícilmente cumplen con el nivel mínimo dado (de los edificios en estudio, el liviano sobrepasa los valores máximos de transmitancia de los muros, mientras que el caso másico cumple tan sólo con el nivel mínimo). Por tal motivo, como primera medida, se propone incentivar la aplicación de las normativas optativas y, a la vez, contribuir con la diferenciación de basamento y torre, tanto en las exigencias relativas a la calidad térmica de las envolventes como en lo que respecta a las protecciones solares, aspectos que aún no son considerados por las normativas. En la Figura 6 se presenta un modelo esquemático para edificios másicos en el contexto ambiental de Mendoza, del cual podrían obtenerse planillas para cada tipología de materialidad de envolvente edilicia.

En base a la metodología empleada, en trabajos futuros se pretende continuar el estudio profundizando en otros aspectos, tales como nuevos sistemas, tecnologías de envolvente y elementos de control, no implementados aún en el contexto local.

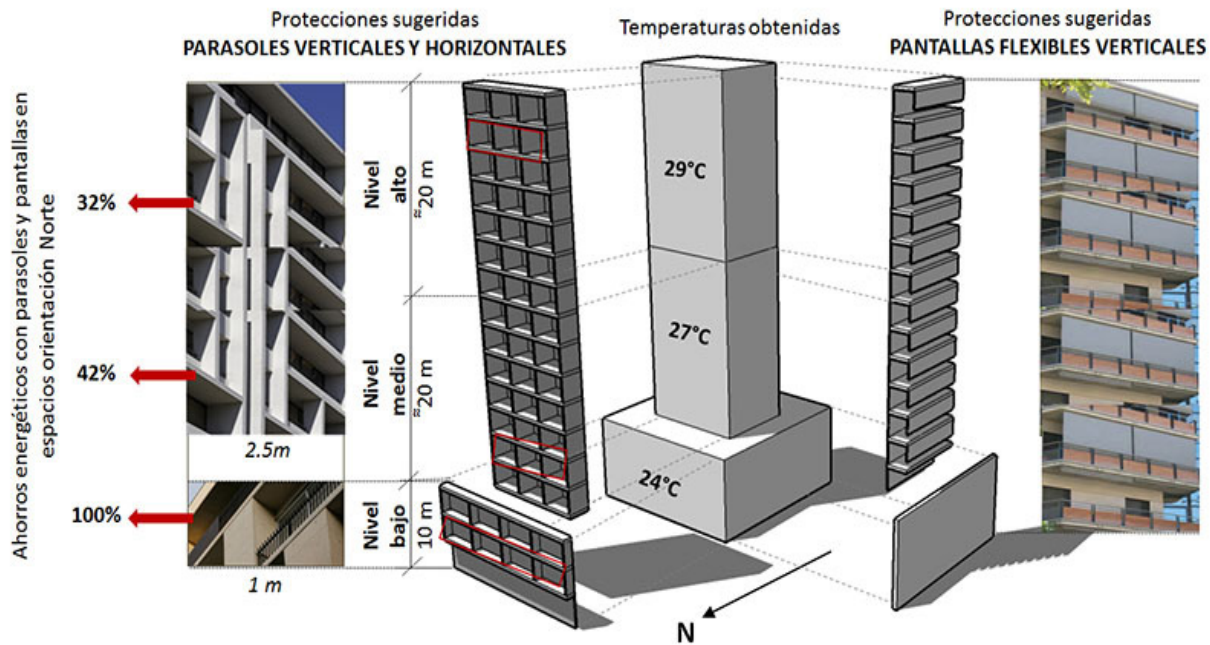


Figura 6. Modelo esquemático de protecciones sugeridas para edificios máscicos según diferentes niveles de altura.
 Fuente: Elaboración de los autores.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a los propietarios de los departamentos evaluados por permitir ser entrevistados y la instalación de equipos de monitoreo. Agradecemos también al CONICET (Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT – PICT 2013-2036) por el soporte financiero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BALTER, Julieta. *Sustentabilidad de edificios en altura en ciudades-oasis. Características arquitectónicas y ambientales para el caso de la ciudad de Mendoza*. Tesis doctoral. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina, 2015.

BALTER, Julieta, GANEM, Carolina y DISCOLI, Carlos. On high-rise residential buildings in an oasis-city: Thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings*, 2016, n° 113, pp. 61-73.

BAKER, Nick y FANCHIOTTI, Aldo. *Daylighting in Architecture: A European Reference Book. Commission of the European Communities*. London, UK: James & James Ltd., 1993.

BÓRMIDA, Eliana. *Mendoza, una ciudad oasis*. Mendoza: Universidad de Mendoza, 1984.

CANTÓN, Alicia; MESA, Alejandro; CORTEGOSO, José Luis y DE ROSA, Carlos. Assessing the solar resource in forested urban environments: results from the use of a photographic-computational method. *Architectural Science Review*, 2003, n° 46, pp. 115-123.

CHO, Jinkyun; YOO, Changwoo y KIM, Yundeok. Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. *Energy and Buildings*, 2014, n° 82, pp. 771-785.

CZAJKOWSKI, Jorge y CORREDERA, Cecilia. Ahorro de energía en refrigeración de edificios para viviendas y propuesta de indicadores de eficiencia y valores admisibles. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2006, n° 10, pp. 9-16.

ENERGY PLUS. *The official building simulation program of the United States Department of Energy* [en línea]. [Consultado 16 junio 2013]. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

EPRE MENDOZA. *Informe demanda Mendoza y Cuyo: 2013* [en línea]. [Consultado 9 febrero 2016]. Disponible en: http://www.epremendoza.gov.ar/_a_adjuntos/Inf_Demanda_Cuyo_ANUAL_2013.pdf

ESTEVEZ, Alfredo y GELARDI, Daniel. Docencia en Arquitectura Sustentable: Programa de Optimización de Proyectos de Arquitectura basado en el balance térmico. *Avances en Energías Renovables y Medioambiente*, 2003, n° 7, pp. 31-34.

FLORES LARSEN, Silvana. Simulación térmica de un edificio de oficinas con doble fachada vidriada en la Ciudad de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 14, pp. 73-80.

FILIPPÍN, Celina y FLORES LARSEN, Silvana. Comportamiento térmico de verano de viviendas unifamiliares compactas en condiciones reales de uso en clima templado en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 14, p. 1-8, 2010.

GIVONI, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Building*, 1992, vol. 18, n° 1, pp 11-23.

GRATIA, Elisabeth y DE HERDE, André. The most efficient position of shading devices in a double skin façade. *Energy and Buildings*, 2007, vol. 39, n° 3, pp. 364-373.

JUODIS, E.; JARAMINIENE, E. y DUDKIEWICZ, E. Inherent variability of heat consumption in residential buildings. *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41, pp. 1188-1194.

LONGOBARDI, M. y HANCOCK, M. *Field Trip Strategies*. TIA 2000 Conference Proceedings. Oxford: Oxford Brookes University, 2000.

MUNICIPALIDAD DE MENDOZA. Código de Edificación, 2000, Ordenanza N°3296/14975/1996.

IRAM (Instituto Argentino de Normalización). *Norma IRAM 11605. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos*, 1996.

OLDFIELD, Philip; TRABUCCO, Dario y WOOD, Antony. Five energy generations of tall buildings: an historical analysis of energy consumption in high-rise buildings. *The Journal of Architecture*, 2009, n° 14, pp. 591-610.

OLGYAY, Víctor. *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1998.

PALMERO-MARRERO, Ana y OLIVEIRA, Armando. Effect of louver shading devices on building energy requirements. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, n° 6, pp. 2040-2049.

TOFTUM, Jørn; ANDERSEN, Rune y JENSEN, Kasper. Occupant performance and building energy consumption with different philosophies of determining acceptable thermal conditions. *Building Environment*, 2009, vol. 44, pp. 2009-2016.