DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 188-198

Ahorro energético con parasol para crecimiento de lechuga en Ciudad de México
Energy savings with light shelf for lettuce growing in Mexico City

G. Ortiz Romero [a,*], C. A.Bigurra-Alzati [b]

[a] *Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura Universidad Nacional Autónoma de México, 04510,Ciudad de México, México .*
[b] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

La Agricultura de Ambiente Controlado (AAC) es una alternativa de producción de alimentos, con ejemplos exitosos en el mundo. Una de sus desventajas es el consumo energético y la Ciudad de México (CDMX) posee un recuso solar mayor que ciudades con AAC. Para esta investigación se desarrolló un prototipo 3D de un espacio interior existente en la CDMX para el crecimiento de lechuga, que aprovecha la luz natural con el fin de lograr rangos óptimos en temperatura (°C), humedad relativa (HR) e iluminancia (lux). Se desarrolló una Optimización Multiobjetivo (OMO) para establecer las dimensiones ideales de un parasol (PS) y controlar la entrada de radiación al interior. Se obtuvo un modelo confiable, obteniendo un Error Medio Absoluto (MAE) de entre 0.8 a 1.2°C. El PS disminuyó el UDI en un rango de 50.5 a 77.8%, siendo el mes de Diciembre en el que se incrementa en un 3%. El PS aporta un 4.2% de horas dentro del rango óptimo de temperatura para los 4 meses analizados.

Palabras Clave: Rango óptimo térmico-lumínico, parasol, lechuga, Ladybug tools.

Abstract

The CEA (Controlled Environment Agriculture) is an alternative for food production, with successful examples all over the world. One of its disadvantages is the energy consumption and Mexico City has a more solar resource than other cities with CEA. For this research, was developed a 3D prototype in an existing interior space in Mexico City for lettuce growing, which takes advantage of daylight to reach optimal ranges of temperature (°C), relative humidity (%) and illuminance (lux). A Multiobjective Optimization was used to obtain the ideal size of a solar shelf (SS) and control the radiation entry into the prototype. A reliable model was obtained, with a Mean Absolut Error between 0.8 to 1.2°C. The SS decreased UDI in a range between 50.5 and 77.8%, and in December increased in 3%. The SS contributes with 4.2% of hours in optimal thermal range for the 4 analyzed months.

Keywords: Thermal-luminic optimal range, solar shelf, lettuce, Ladybug tools.

1. Introducción

En las ciudades ocurren de manera constante intercambios y migraciones de personas desde diversos lugares. Su crecimiento es innegable y desde el 2007 la población urbana superó a la población rural por primera vez en la historia de la civilización humana. Para el 2050, se estima que 7 de cada 10 personas vivirán en las ciudades y el 80% de la producción total de alimentos se consumirá también en ellas (Ellen McArthur Foundation, 2019).

El cambio climático genera más sequías, desertificación e incluso más precipitación pluvial en lugares donde no se esperaba.

La agricultura consume 70% del agua disponible y del total de las emisiones de las ciudades que forman parte del organismo de C40 Cities (Ciudad de México es miembro), 13% es debido a la producción y distribución de alimentos. La FAO publicó datos de insuficiencia alimentaria: en 2024, la sufrieron 2200 millones de habitantes en el planeta y 1700 millones corresponden a personas que viven en zonas urbanas y periurbanas. Para el año 2050 se estima que 2500 millones sufrirán de insuficiencia alimentaria, 650 millones tendrán problemas de acceso al agua y 1600 millones de habitantes padecerán olas de calor extremo, 8 veces más habitantes que en el 2017 (C40 Cities & Arup, 2017).

México no está exento de este problema. Consume un 6% más que el promedio mundial del agua disponible destinada a

*Autor para la correspondencia: gil.ortiz7.arq@gmail.com
Correo electrónico: gil.ortiz7.arq@gmail.com (Gilberto Ortiz Romero), carlos_bigurra@uaeh.edu.mx (Carlos Alfredo Bigurra Alzati).

Historial del manuscrito: recibido el 08/06/2026, última versión-revisada recibida el 28/08/2026, aceptado el 08/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18104

agricultura y se calienta a un ritmo mayor que el promedio mundial (Estrada Porrúa, 2026). Rojas & Torres (2019) estimaron que se requerirán para el 2030, 8.5 millones de hectáreas más para cultivos si es que se busca garantizar la suficiencia alimentaria en el país.

La Ciudad de México (CDMX) forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La ZMVM concentra la mayor densidad de población y genera el 43% del PIB del total de las zonas metropolitanas del país. En esta delimitación sólo un 2.7% de la población es rural (INEGI, 2020), por lo que depende de la producción agrícola de regiones diversas dentro y fuera del país.

1.1. Agricultura de ambiente controlado (AAC)

Desde finales del siglo XX, han surgido diversas opciones para producir alimentos sin tener que depender de las grandes extensiones para la agricultura a campo abierto. Surge la AAC en países como Japón, Estados Unidos, Suecia e Inglaterra con diversas variantes: a) invernaderos con sistemas de control de clima e iluminación, b) Granjas verticales (GV), concepto desarrollado por Dickson Despommier (2010), c) Zero Acreage Farming, proyecto desarrollado por Tomahier (2015) en Alemania para el aprovechamiento de espacios residuales y azoteas dentro de las ciudades.

El concepto general de la AAC consiste en espacios interiores construidos, en los que se crean las condiciones ideales (temperatura bulbo seco-humedad-iluminancia) para el crecimiento de plantas para consumo humano. Pueden tener implementados de manera parcial o total, sistemas activos como aire acondicionado/calefacción (HVAC) y sistemas de iluminación artificial (SIA). Respecto a las GV, se han implementado más de 100 en Japón, 102 en Taiwan, 12 en Singapur y muchas más distribuidas entre los estados costeros de Estados Unidos y el norte de Europa principalmente (Despommier, 2023).

La AAC brinda ventajas en comparación con la agricultura a campo abierto (ACA) o invernaderos (INV), y también proporciona ventajas a escala urbana. Respecto a la ACA e INV, la AAC brinda mayor rendimiento de producción. Goto (2016) reporta que se obtiene hasta 12 veces mayor producción de lechuga, 4 veces más fresa y 3.6 veces mayor producción de arroz. La AAC consume de 4 a 7 veces menos agua y hay casos en los que no es necesario el uso de fertilizantes y pesticidas, que es el rubro de mayor impacto ambiental de la ACA (Orsini et al., 2020). En sistemas hidropónicos se consume un 70% menos agua y con sistemas aeropónicos hasta un 90% menos consumo, teniendo principalmente los sistemas de aspersores (Despommier, 2023).

A escala urbana la AAC permite disminuir la demanda de infraestructura para el transporte de alimentos y libera tierra arada para la reconstitución de ecosistemas afectados, que a su vez permiten mayor capacidad de captura de CO_2 y estabilizar temperaturas al tener mayor vegetación.

Las principales desventajas de la AAC es su costo de implementación elevado y su consumo energético durante su operación, principalmente por los SIA. Van Ginkel, Igou & Chen (2017) calcularon que se consume hasta 30 veces más electricidad en una GV en Atlanta, GA (Estados Unidos) en comparación con la ACA en el campo de California. Martin, Elnour & Siñol (2023) determinaron que es importante establecer cada caso debido al origen diverso de la energía, al analizar una GV para producir lechuga en Suecia, en comparación con la importación de alimentos desde España y Países Bajos. Benis, Reinhardt & Ferrao (2017) calcularon que una infraestructura de AAC en Lisboa (Portugal) con muros de concreto y una relación macizo-vano del 40% en cada fachada y en cubierta, puede ahorrar 3 veces el consumo eléctrico del SIA al aprovechar la luz natural. Ward, Jans-Singh & Choudhay (2018) indican que, si se optimizan los ángulos de luz natural incidente se puede minimizar el consumo de SIA.

De acuerdo con Kreuger, Meeuws & Meeuws (2017), la esencia para optimizar el consumo energético en la AAC consiste en aprovechar al máximo la luz, reduciendo la radiación directa en la planta. Esto controla la evapotranspiración, que es energía que la planta puede destinar en la generación de nutrientes en lugar de evapotranspirar para ajustar su temperatura (ver fig. 1).

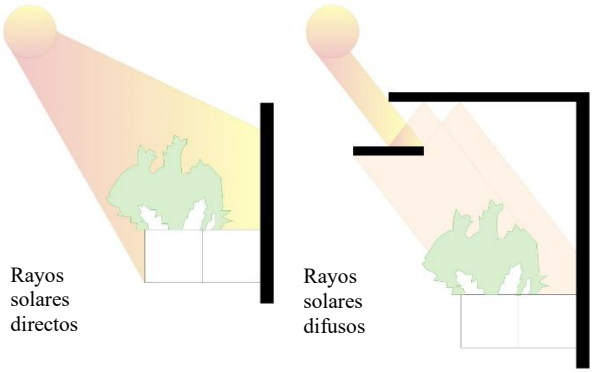


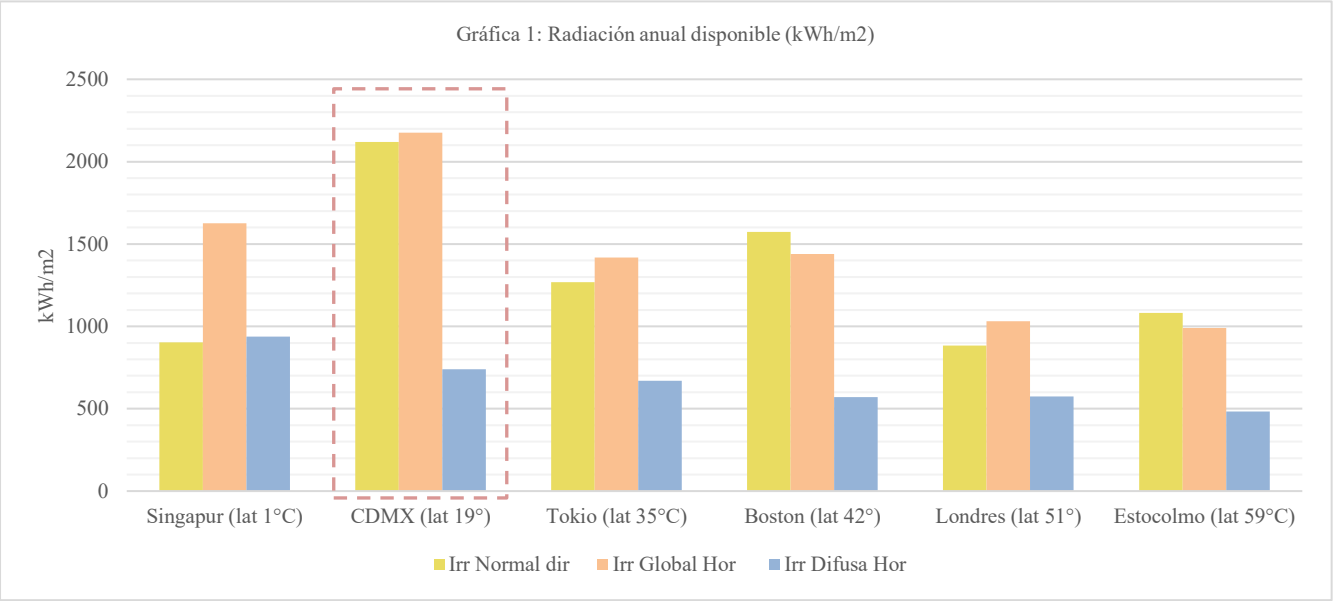
Figura 1: Luz natural directa y difusa a planta implementando un parasol (PS), disminuyendo la radiación directa basado en el principio de Kreuger et al. (2017). Elaboración propia en Autocad.

1.2. Clima y recurso solar en la CDMX

La CDMX comprende el 18.9% de la superficie total de la ZMVM. El clima de la CDMX, de acuerdo con la clasificación de Koppen modificada por Enriqueta García es: Cwb, clima templado subhúmedo con invierno seco y verano templado con temperaturas menores a 22°C. Temporada de lluvia entre los meses de mayo y octubre.

Al estar ubicada entre el trópico y ecuador, el recurso solar en la CDMX es menos cambiante que en otras regiones al norte, donde hay más casos de AAC implementada con éxito. En el periodo del 18 de mayo al 27 de julio, el sol no proyecta radiación directa en la fachada sur, dentro del periodo de temporada húmeda. Tanto un equinoccio y un solsticio ocurre en temporada seca (marzo y diciembre respectivamente) y en temporada húmeda (septiembre y junio respectivamente).

Se comparó la radiación e iluminancia disponible anual en las 8760h del año, para las ciudades de CDMX en la ZMVM (lat. 19°N), Singapur (lat. 1°N), Tokio (lat. 35°N), Boston (lat. 42°N), Londres (lat. 51°N), Estocolmo (lat. 59°N). Se eligieron estas ciudades por tener ejemplares implementados de AAC. En términos de radiación solar, la CDMX recibe un rango de entre 29% y 51% mayor radiación (KWh/m^2) que ciudades con AAC ya implementadas con éxito; y un rango de 16% a 47% mayor iluminancia (lux). En la gráfica 1 se muestran los niveles de radiación de las ciudades mencionadas: la CDMX destaca en radiación directa normal y global en comparación con el resto de las ciudades.



Gráfica 1: Radiación global, directa y difusa anual disponible. Elaboración propia en MS Excel.

1.3. Estrategia de diseño pasiva. Parasol (PS)

Las estrategias pasivas se implementan con el propósito de aprovechar el recurso del sol, viento y otros fenómenos climáticos para adecuar la temperatura e iluminación en los edificios (Dekay & Brown, 2014). Pueden funcionar como sustitutos totales o parciales de sistemas activos como HVAC y SIA.

El parasol (PS) es una de las estrategias pasivas que permite controlar la radiación directa a un espacio interior. Consiste en un PS exterior (PSext) y otro interior (PSint), ubicados en sentido perpendicular a una ventana y pudiendo variar la altura respecto al plafón o losa del espacio interior (ver fig. 2). Cada PS intercepta la radiación directa del sol, dependiendo sus dimensiones, ubicación respecto a la ventana y la altura solar (grados, °). Al evitar la radiación directa, la luz incide en un ángulo normal a la superficie del PS que finalmente llega al plafón o losa del espacio interior, iluminándolo con luz difusa.

1.4. Optimización multiobjetivo en arquitectura

La Optimización Multiobjetivo (OMO), también conocido como Frente de Pareto, es un proceso estadístico que permite obtener un conjunto de soluciones que cumplen con los objetivos planteados del problema.

En los últimos años se han propuesto soluciones en arquitectura. Noorzai et al. (2023) optimizaron las dimensiones de PS con celdas fotovoltaicas integradas para una fachada en Teherán, Irán. Bahdad et al. (2022) desarrollaron un modelo para optimizar el confort térmico y lumínico de un espacio de trabajo en Penang, Malasia en función de parámetros propuestos de un PS. En ambas investigaciones, se realizaron simulaciones y OMO para los días de solsticios y equinoccios.

2. Problema de investigación

El clima en la CDMX aportará al problema, en que las cadenas de suministro de alimentos sean más vulnerables, al provocar sequías, inundaciones y estrés hídrico en lugares de los que provienen los alimentos cosechados en la agricultura. La CDMX no está preparada para lograr la suficiencia alimentaria, siendo dependiente de otras regiones a nivel nacional y de otros países. No existen estudios ni infraestructuras de implementación de AAC a nivel local, mientras que hay potencial de aprovechar espacios residuales y dentro de los edificios. Este potencial combinado con una ubicación favorable para aprovechar el recurso solar y adecuar espacios interiores dentro de rangos óptimos térmicos y lumínicos, respecto a otras ciudades con AAC implementadas y sus variantes de espacios interiores para crecimiento de plantas, sin usar o minimizando el uso de sistemas activos (HVAC y SIA).

En esta investigación se propone determinar las horas en las que se logra delimitar la condición térmico-lumínico-humedad relativa óptima para el crecimiento de lechuga (lactuca sativa).

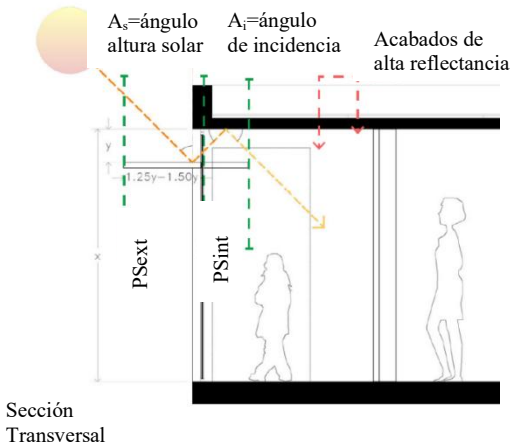


Figura 2: Parasol interior-exterior tipo, basado en Dekay et al (2014). Elaboración propia en Autocad.

Horas en las que no sea necesario el uso de sistemas activos de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Temperatura bulbo seco (Tbs,°C) interior de 20 a 25°C (de acuerdo con Gramaans et al., 2018 y Engler & Krarti, 2021).

- Humedad relativa (HR, %) interior de 50 a 85% (rango recomendado por Eaton et al., 2023).
- Iluminancia (lux, E) de 5,400 (5.4klux) a 20,000lux (20klux). De acuerdo con el principio de Kreuger et al (2017), evitar la radiación solar directa en la planta para evitar evapotranspiración innecesaria responde a un rango de iluminancia para un día nublado (hasta 40,000lux). Se limita a 20klux al reportarse quemaduras en plantas de 370 a 400 µmol/m2s, que equivalen al rango máximo propuesto por Bugbee (2019) de 1µmol/m^2s=54lux.

Se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuántas horas al mes es posible mantener los rangos óptimos térmico-lumínicos-humedad relativa para el crecimiento de lechuga (lactuca sativa) en un espacio interior al sur de la CDMX con la implementación de un PS?

3. Objetivos

Objetivo general:
- Obtener horas totales por mes dentro del rango óptimo térmico-lumínico, en las que no sea necesario activar sistemas HVAC o SIA.

Objetivos específicos:
- Obtener error absoluto medio menor a 3°C para calibración de modelo térmico-lumínico para simulaciones (SIM).
- Contrastar resultados horarios por mes, en un prototipo propuesto en 3 casos: a) sin PS y con plantas; b) con PS de optimización multiobjetivo y con plantas.

4. Método

Se diseñó un prototipo basado en un espacio existente al sur de la CDMX (lat. 21.358°N, long. 99.126°O y 2240 msnm), con un ventanal en fachada sur para aprovechar la luz natural (fig. 3). El espacio existente está contenido por elementos constructivos comunes en la CDMX: muros de ladrillo con aplanados cemento-arena al exterior y de yeso al interior; losas (intermedia y de azotea) de concreto armado con rellenos de tezontle (piedra ligera) con piso vinílico blanco al interior y enladrillado en azotea; el vidrio de cristal claro común del ventanal es de 6mm, con un SHGC de 0.80 con posibilidad de una abertura del 25% del área total del vidrio; el marco del ventanal es de herrería, sin aislantes térmicos. Al PS se le asignó una reflectancia de 0.80.



Figura 3: CDMX dentro de la ZMVM. Ubicación del prototipo en el punto negro. Mapa de elaboración propia con base en SEDATU,CONAPO,INEGI (2020).

Se modeló el contexto inmediato con una reflectancia de 0.60 y sin vegetación cercana. El prototipo propuesto contiene en el espacio interior existente un muro en el que se alojan las plantas, enfrente del ventanal y a una distancia que se determinará con la OMO (ver fig. 4).

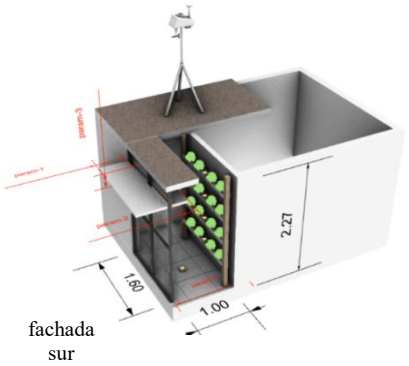


Figura 4: Vista de modelo 3D del prototipo propuesto (cotas en mts). Elaboración propia en Rhino 6.

En la fig. 5 se muestra el orden de pasos para obtener las horas dentro de los rangos óptimos:

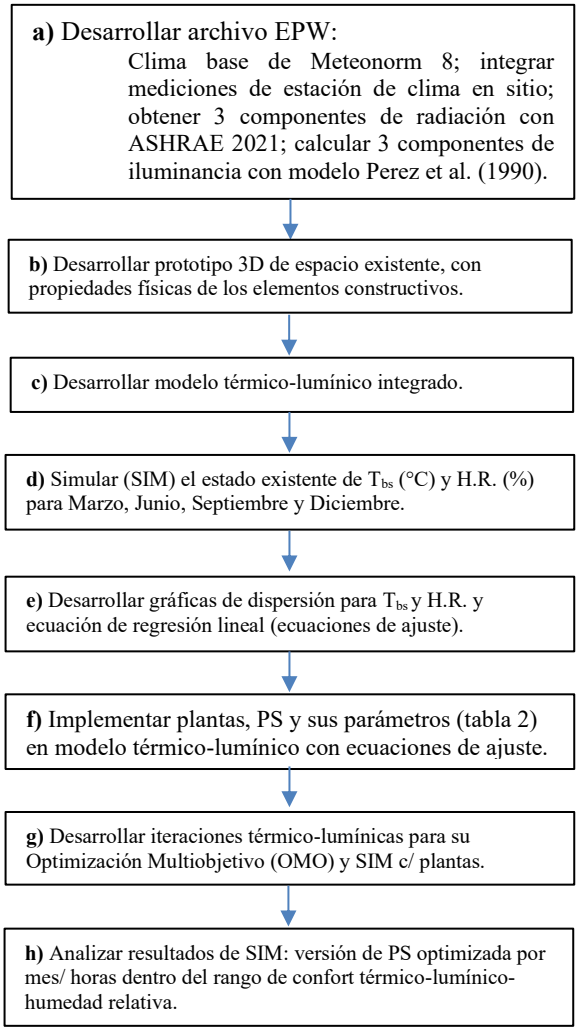


Figura 5: Pasos para obtener las horas. Elaboración propia. vis

Vantage Vue para obtener datos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) exterior e interior para ajustar el modelo térmico-lumínico.

El archivo base, con datos horarios de clima, Energy Plus Weather (EPW, etapa a. en fig. 5) se obtuvo de Meteonorm 8.2.0 (Remund et al., 2020). A este archivo se implementaron los datos exteriores de Tbs, HR, temperatura de punto de rocío y viento obtenidos de las mediciones de estación de clima. Los datos de radiación e iluminancia se calcularon con los modelos del ASHRAE Fundamentals 2021 y Perez et al. (1990). El prototipo se modeló en el programa 3D Rhino 6 y para las simulaciones (SIM), se usó el conjunto de plugins de *Ladybug tools* (LBtools): en el plugin de *Honeybee* (HB) se ligó el modelo 3D y se asignaron las propiedades físicas de los materiales constructivos por medio del plugin de *Honeybee Energy* (HB-E) (etapa b. en fig. 5), en el que también se desarrollaron las SIM para obtener Tbs y HR interiores en los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre (solsticios y equinoccios). Los niveles lumínicos se obtuvieron mediante el plugin *Honeybee Radiance* (HB-R) (etapa c. en fig. 5).

Los parámetros usados en HB-R se presentan en la tabla 1. Los parámetros de *-t* y *-lt* indican el valor mínimo del rango óptimo UDI (%, horas) respectivamente. Para esta investigación el valor mínimo fue de 5,400lux. El parámetro de *-ut* indica el valor máximo del rango óptimo en UDI, en el que se limitó a 20,000lux. En el parámetro *-ab* se asignaron 5 rebotes de luz para que simulara los rayos de luz después de llegar al PS.

El parámetro *-ad* limita el nivel mínimo del rayo que aporta luz en el modelo; y *-lw* el nivel de detalle de los puntos de luz que llegan a las superficies. Se respetaron los valores por default del plugin para *-ad* y *-lw*.

Tabla 1. Parámetros para SIM en HB-R.

-t	-lt	-ut
5,400	5,400	20,000
-ab	-ad	-lw
5	5000	2e-05

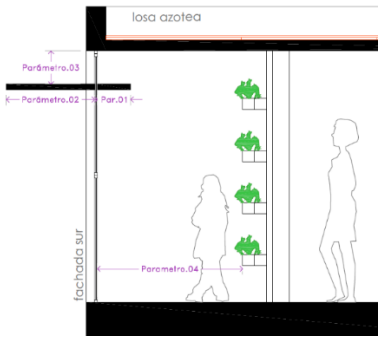
Al tener un modelo integrado, se realizaron SIM (etapa d. en fig. 5) con la versión del espacio existente y se compararon con las mediciones de la estación de clima instalada. Esto permitió obtener ecuaciones de ajuste (etapa e. en fig. 5) mediante el proceso de regresión lineal por cada mes, para Tbs y HR interiores. Se calculó el Error Absoluto Medio (MAE) por cada hora y se comparó con los rangos propuestos por la Agencia Internacional de Energía, Anexo 58, indicado por González & Bandera (2022).

Se implementó el PS con los parámetros indicados en la tabla 2 y las geometrías que representan las plantas (etapa f. en fig. 5) en el modelo 3D (fig. 6). Para generación del material para plantas, se utilizó el componente *HB Vegetation Material* de HB-E, usando parámetros de Gramaans et al. (2017).

Tabla 2: Parámetros de PS para OMO

Parámetro	Rangos
p.1 PS interior	0.10 a 0.40m
p.2 PS exterior	0.20 a 0.60m
p.3 Dist. a losa superior	0.00 a 0.40m
p.4 Dist. a ventanal	1.00 a 1.50m

(incrementos en rangos a cada 0.10m)



Sección Transversal

Figura 6: Parámetros de repisa para OMO. Elaboración propia en Autocad basado en prototipo propuesto.

Se integraron los elementos anteriores para la OMO en el plugin *Wallacei* (etapa g. en fig. 5), en la que se obtuvieron tanto las combinaciones de parámetros para PS (de tabla 2) y las horas dentro de los rangos óptimos para temperatura, humedad relativa y UDI (% de horas) que es la unidad para indicar el porcentaje de horas en las que se está dentro del rango óptimo (-lt y -ut en tabla 1, lux), delimitado por mes y en las horas en las que hay luz natural disponible. En la tabla 3 los parámetros introducidos en *Wallacei* y en la fig. 7 se muestran las entradas y salidas del proceso de OMO.

Tabla 3: Parámetros de OMO en *Wallacei*.

Gen. Size	Gen. count	Cprob	Mprob	Random seed	CD index	MD index
15	7	0.9	1/n	0	20	20

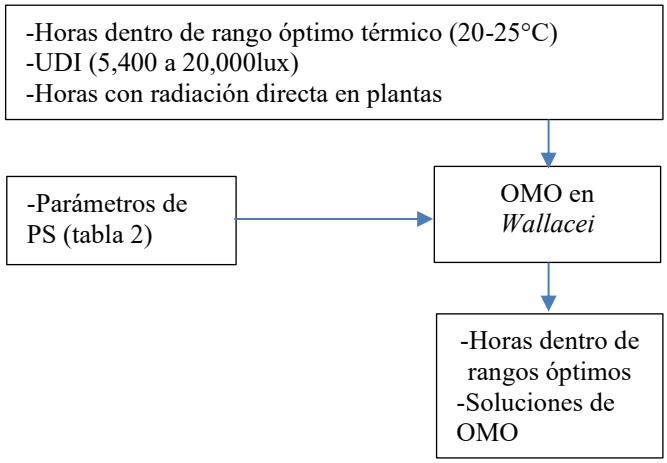
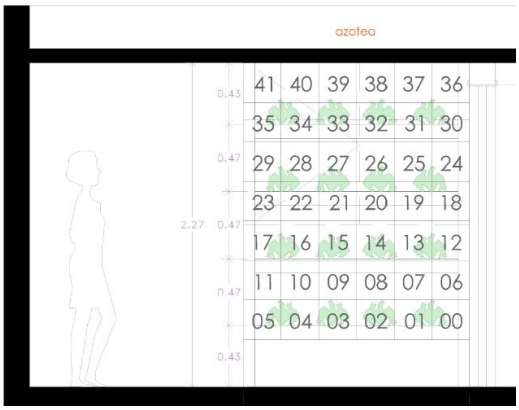


Figura 7: Proceso para OMO en *Wallacei*.

En la OMO, los 2 primeros parámetros definen el total de iteraciones que combina a los parámetros de PS, para optimizar las horas dentro de los rangos térmicos y lumínicos. Por mes, se realizaron 105 iteraciones con aleatorización total (random seed=0, de tabla 3). En preexperimentos del modelo térmico-lumínico (etapa c en fig. 5), se observó que el PS tiene baja influencia en la HR interior, por lo que se sustrajo para el proceso de la OMO. Para medir el UDI, se creó en HB-R una red de 42 sensores de iluminancia (lux) al límite de las plantas. El resultado de UDI es la suma de los 42 sensores al mes (fig. 8).



Sección Longitudinal

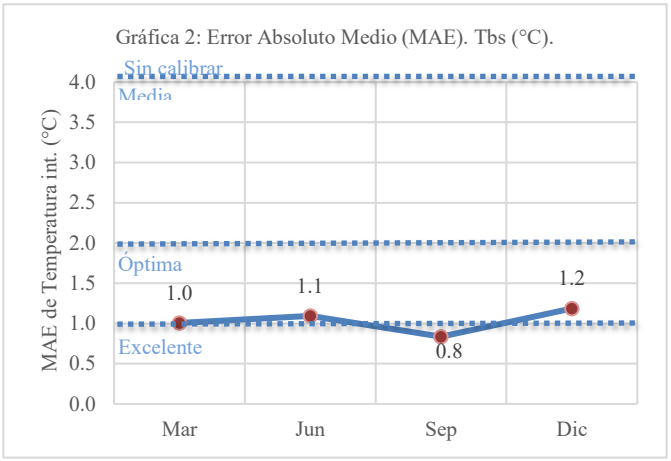
Figura 8: Red de sensores para iluminancia y UDI (cotas en mts). Elaboración propia en Autocad basado en prototipo propuesto.

En la fig. 7 se muestra en la parte superior el cuadro con la información de entrada para desarrollar la OMO en *Wallacei*. La OMO permite obtener los rangos que plantea el problema. Se especificó en el algoritmo de cálculo que se brinden soluciones optimizadas en base a que se maximicen las horas dentro del rango óptimo térmico y UDI, mientras que se minimicen las horas de radiación directa en las plantas (medidos por la red de 42 sensores en HB-R).

5. Resultados y Discusión

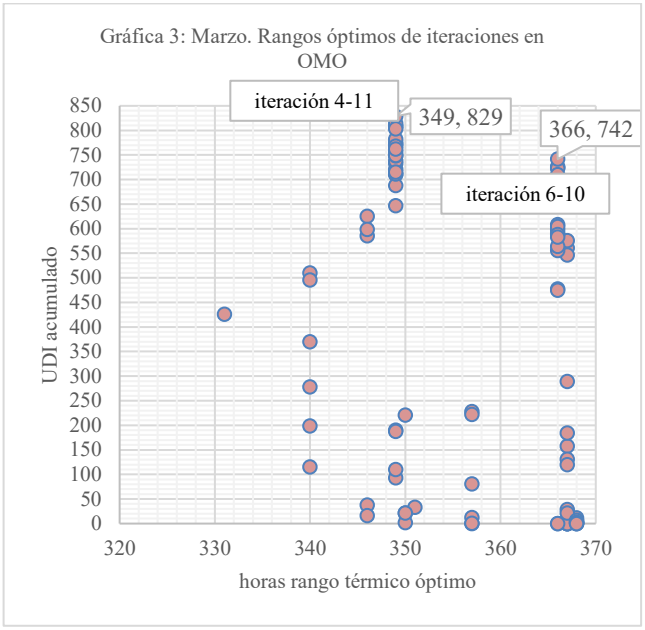
5.1. Error Absoluto Medio y OMO

Los valores obtenidos de MAE para temperatura quedan dentro de los rangos delimitados como "óptimo" a "excelente" de acuerdo con el Anexo 58 de la Agencia Internacional de Energía (gráfica 2). El mes con menor MAE fue Septiembre con 0.8°C y el mayor con 1.2°C, el mes de Diciembre.



Gráfica 2: Error absoluto medio. Elaboración propia.

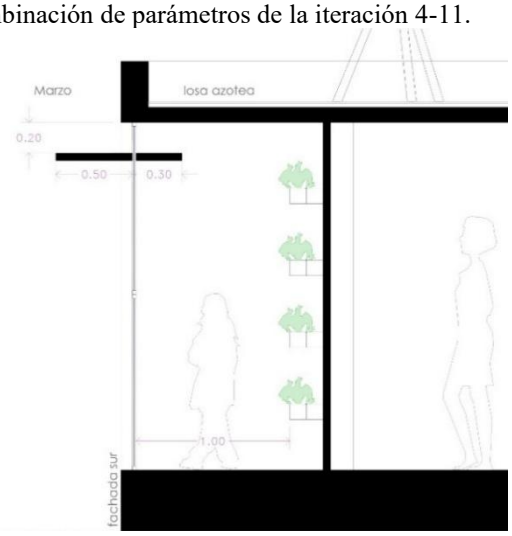
La OMO se desarrolló en cada mes, obteniendo 105 iteraciones de las que extrajo una solución óptima en términos de las horas dentro del rango térmico, lumínico y reduciendo las horas con radiación directa en las plantas.



Gráfica 3: Junio. Rangos óptimos de iteraciones en OMO. Elaboración propia

Gráfica 4: Junio. Rangos óptimos de iteraciones en OMO.
Gráfica 3: Marzo. Rangos óptimos de iteraciones en horas. Elaboración propia en MS Excel.

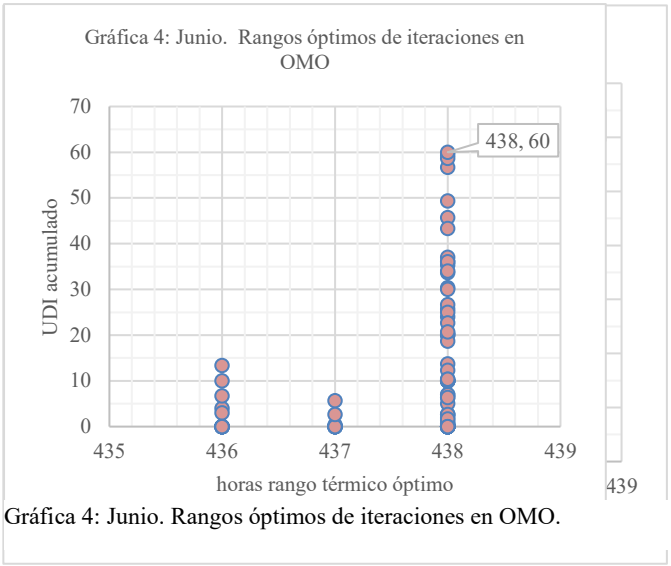
Para el mes de Marzo, la OMO obtuvo rangos entre 331 a 368h para la Tbs interior de las 744h totales del mes. Se obtuvo un rango de 0 a 829 UDI en las 105 iteraciones (7 generaciones y 15 iteraciones cada una) y en el total de ellas se lograron 0h de radiación directa en las plantas. En la gráfica 3 se muestran los resultados de las iteraciones teniendo los mejores resultados en las iteraciones 4-11 y 6-10. Al no tener horas con radiación directa en plantas, el problema de optimización se representa por lo tanto, con sólo 2 ejes. Se muestra en la fig. 9 la combinación de parámetros de la iteración 4-11.



Sección Transversal

Figura 9: Combinación con horas optimizadas para Marzo (cotas en mts). Elaboración propia en Autocad basado en OMO.

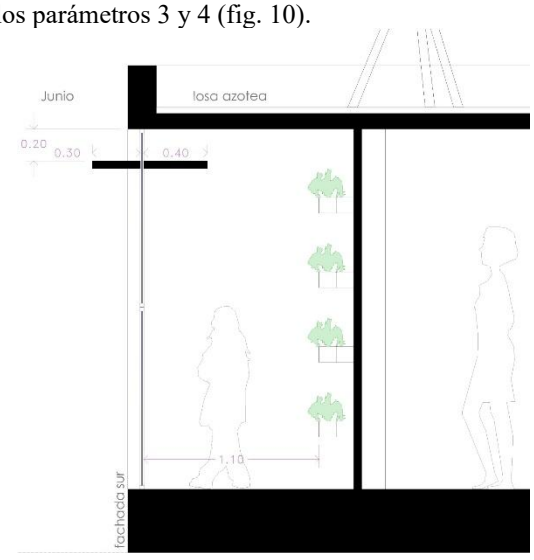
Para Junio, la radiación directa es ausente en fachada sur por lo que la ganancia de luz natural es por medio de luz difusa únicamente que se refleja hacia el interior del espacio del prototipo propuesto. Este mes resultó con el rango más



Gráfica 4: Junio. Rangos óptimos de iteraciones en OMO.

estrecho en horas de Tbs interior (436 a 439h, de las 720 totales del mes) y la menor aportación del PS al UDI (60). En comparación con la gráfica 3 (de Marzo), las horas dentro rango térmico óptimo es mayor pero con menos opciones obtenidas por la OMO (gráfica 4).

Para la combinación de parámetros del PS, los parámetros 1 y 2 difieren de los de marzo y se mantienen los mismos valores para los parámetros 3 y 4 (fig. 10).

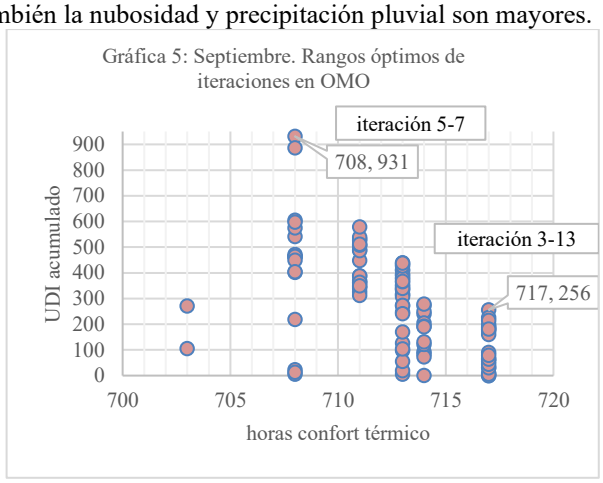


Sección Transversal

Figura 10: Combinación con horas optimizadas para Junio (cotas en mts). Elaboración propia en Autocad basado en OMO.

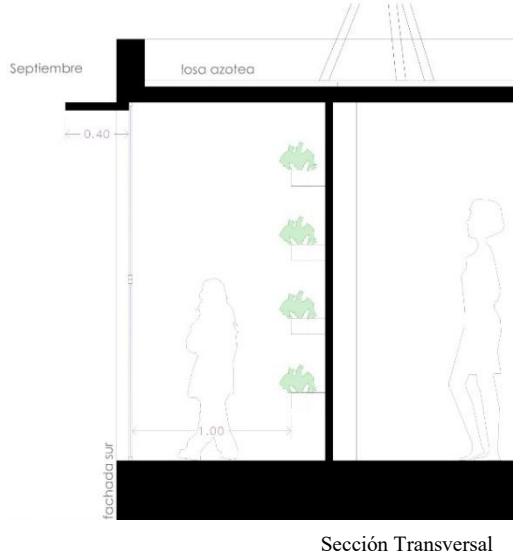
En Septiembre, la OMO obtuvo rangos entre 703 a 717h para la Tbs interior de las 720h totales del mes. Se obtuvo un rango de 0 a 931 UDI en las 105 iteraciones y en el total de ellas se lograron 0h de radiación directa en las plantas. En la gráfica 5 se muestran los resultados de las iteraciones teniendo los mejores resultados en las iteraciones 5-7 y 3-13. Al igual que en Marzo, Al no tener horas con radiación directa en plantas, el problema de optimización se representa con sólo 2 ejes. Se muestra en la fig. 11 la combinación de parámetros de la iteración 5-7.

La combinación de parámetros del PS difiere totalmente de los primeros meses presentados (fig. 11). En Septiembre la trayectoria solar es casi idéntica al mes de Marzo, en ambos meses ocurren equinoccios. En la CDMX, la diferencia radica en que en el equinoccio de primavera ocurre en la temporada seca y el equinoccio de otoño en la temporada húmeda, en que también la nubosidad y precipitación pluvial son mayores.



Gráfica 5: Septiembre. Rangos óptimos de iteraciones en OMO.

En Diciembre, la OMO obtuvo rangos entre 428 a 488h para la Tbs interior de las 744h totales del mes. Se obtuvo un rango de 436 a 1366 UDI en las 105 iteraciones y en el total de ellas se lograron de 24 a 959h de radiación directa en las plantas.



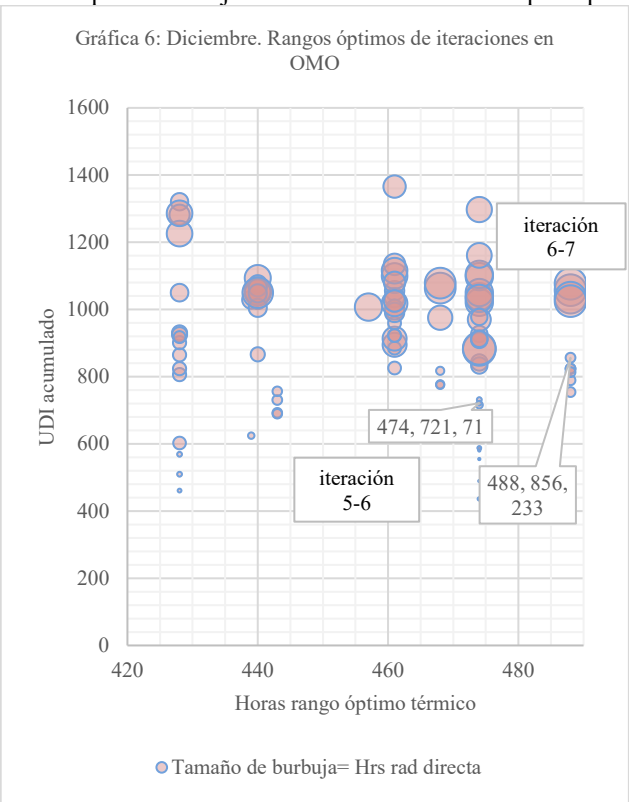
Sección Transversal

Figura 11: Combinación con horas optimizadas para Septiembre (cotas en mts). Elaboración propia en Autocad basado en OMO.

En la gráfica 6 se muestran los resultados de las iteraciones teniendo los mejores resultados en las iteraciones 4-11 y 6-10. Para el caso de Diciembre, la trayectoria solar tiene los niveles más bajos y ocurre el solsticio de invierno. La gráfica muestra los mismos ejes presentados de las gráficas 3, 4 y 5 con la diferencia del tamaño de cada iteración. El tamaño de cada una está en proporción de las horas de radiación directa acumulada en la red de sensores de iluminancia. Se muestra en la fig. 12 la combinación de parámetros de la iteración 5-6.

La combinación de parámetros del PS posee una particularidad en comparación con los 3 meses previos analizados. La distancia que poseen las plantas respecto al ventanal (parámetro 4) es el valor máximo asignado dentro de los rangos indicados en la tabla 2. Al estar el sol con los valores más bajos de altura solar en todo el año, los rayos solares entran al espacio interior en trayectorias más

horizontales. En esa zona la OMO tiende a alejar el muro con plantas respecto a la entrada de radiación directa. Ese ajuste puede ser por 2 vías: ajustando las dimensiones de p.2 o p.4.



Gráfica 5: Diciembre. Rangos óptimos de iteraciones en OMO.

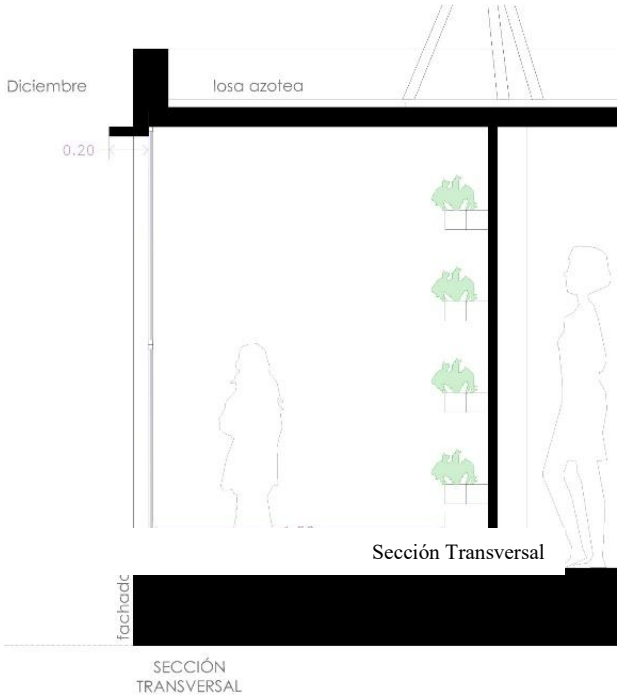


Figura 12: Combinación con horas optimizadas para Dic. (cotas en mts). Elaboración propia en Autocad basado en OMO.

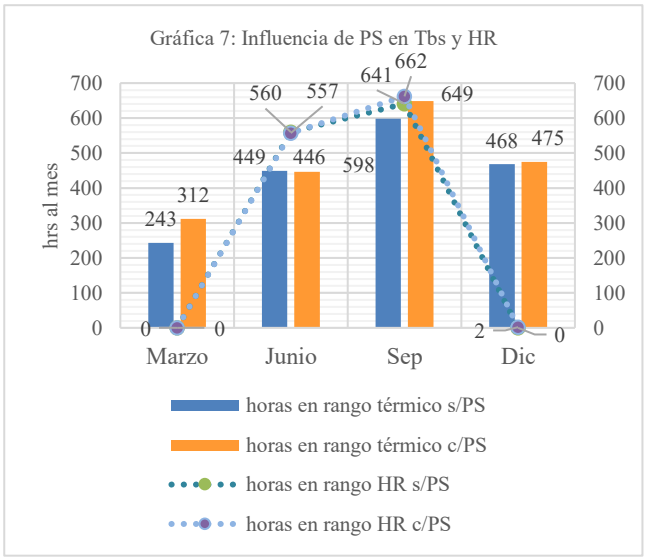
Las combinaciones que optimizan los rangos de horas para el crecimiento de lechuga varían en las dimensiones interior y exterior de PS (p.1 y p.2). La distancia a losa superior (p.3) optimizó con sólo 2 valores para los 4 meses y la distancia ventanal permaneció en el valor mínimo propuesto a excepción del mes de Diciembre (tabla 4).

Tabla 4: Parámetros con resultados optimizados de OMO

	p.1	p.2	p.3	p.4
Marzo	0.30	0.50	0.20	1.00
Junio	0.40	0.30	0.20	1.00
Septiembre	0.40	0.40	0.00	1.00
Diciembre	0.20	0.30	0.00	1.50

5.2. Aportación del PS

Al añadir plantas al prototipo, se incrementa la temperatura interior, disminuyendo las horas dentro del rango óptimo. La menor cantidad de horas Tbs interior dentro del rango ocurre en Marzo (mes cálido y seco); el mes con más horas Tbs interior dentro del rango ocurre en Septiembre, ambos meses en los que se presentan los 2 equinoccios anuales y con la diferencia de que uno es mes seco y el otro dentro de la temporada húmeda en la CDMX. El total de horas en los 4 meses que incrementa el PS dentro del rango térmico es de 124, que corresponde al 4.2% del total de horas en los 4 meses analizados (gráfica 7). Las rectas punteadas representan las horas dentro del rango de HR sin PS e incluyendo el PS. Se observa un empalme de ambas rectas, lo que indica una influencia poco importante del PS para modificar la HR. El total de horas que aporta el PS es de únicamente 20, que representan el 0.7% del total de horas de los 4 meses analizados (gráfica 7).

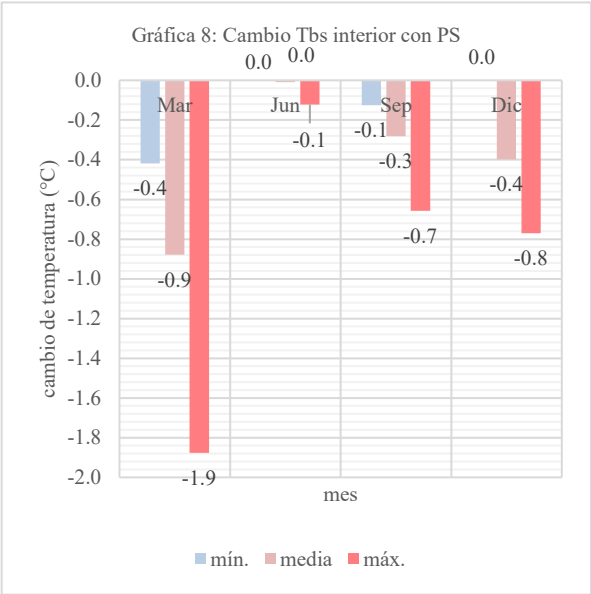


Gráfica 7: Influencia de PS en Tbs y HR.

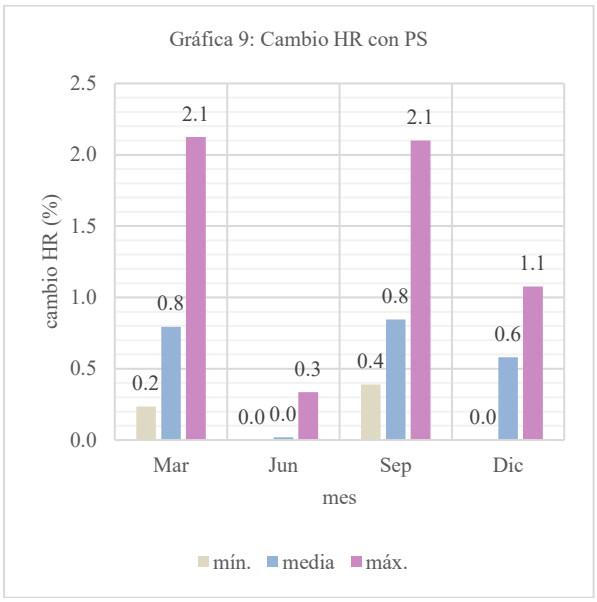
La gráfica 8 muestra el cambio de temperatura medio, mínimo y máximo con la implementación del PS. Se observa que en Marzo la disminución de temperatura es más sensible respecto al resto de los meses analizados. Junio, que es el mes en el que la fachada sur no recibe radiación solar directa, la influencia del PS es prácticamente nula. En Septiembre y Diciembre la influencia del PS es menor entre un 32 a 45% respecto a los niveles de Marzo.

En la gráfica 9 se observa la aportación del PS a la HR. El incremento medio es de un rango de 0.6 a 0.8%. La influencia máxima es de 2.1% para Marzo y Septiembre, que en comparación al rango óptimo de 50 a 85%, es un cambio poco

importante. Al igual que para Tbs, Junio es el mes en el que el PS da la aportación menor a los rangos óptimos para el crecimiento de lechuga. Para Septiembre y Diciembre la aportación del PS no supera el 1% para disminuir la HR.



Gráfica 8: Cambio Tbs interior PS.



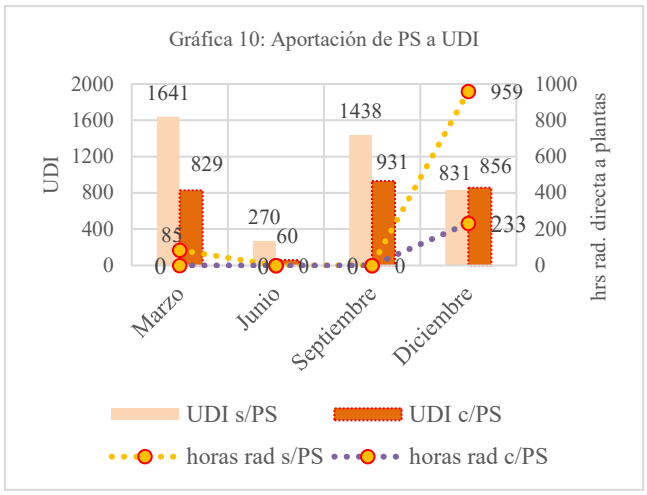
Gráfica 9: Cambio HR con PS.

Al no existir un proceso de humidificación en el prototipo, el cambio de HR es debido al cambio de temperatura, que sí es afectado por el PS al limitar la radiación directa en el ventanal en fachada sur. Esto se observa al tener cambios de horas dentro del rango térmico para los meses de Marzo, Septiembre y Diciembre, y no siguiendo este comportamiento en Junio, que es el mes sin radiación solar directa al ventanal.

En Marzo el UDI acumulado sacrifica un 50.5% con el PS implementado, reduciendo la radiación directa de 85 a 0h. En Junio el UDI disminuye un 77.8% y siendo el mes en el que hay nula aportación en el rango térmico, se comprueba que es más favorable no implementar PS en periodos en los que no hay radiación solar directa al ventanal (gráfica 10).

Septiembre es uno de los meses en el que hay radiación directa en ventanal, pero no en las plantas con un valor de 1.00m en el p.4 (distancia a ventanal, tabla 2). Con el PS el UDI disminuye un 64%. El rango térmico tiene un incremento con el PS, por lo que en casos como este, es necesario desarrollar un modelo que permita balancear los beneficios del PS, en base a los consumos energéticos HVAC y SIA.

En Diciembre también será necesario desarrollar el análisis para balancear el uso de HVAC y SIA. Es el único mes en el que hay una aportación del PS al UDI, incrementándolo un 3% para la red total de sensores.



Gráfica 10: Aportación de PS a UDI.

6. Conclusiones

El PS es un elemento constructivo útil para combinar con elementos traslúcidos como ventanas y es necesario comprender sus limitaciones como cualquier estrategia pasiva. La temporada seca y cálida es la más sensible a la disminución de temperatura con el PS implementado y tiene una nula contribución al rango óptimo de HR para el crecimiento de lechuga. Otro conocimiento a considerar para implementar un PS, será el tener los rangos de Tbs interior, para mayor claridad de si sólo con el PS se disminuye la temperatura a los rangos óptimos sin sistemas activos y delimitar en qué horarios puede lograrlo.

Las virtudes de los PS indicadas por DeKay et. al (2014) no se cumplen en los 4 meses analizados en el prototipo propuesto, siendo únicamente Diciembre, el mes en el que el PS incrementa el UDI. Analizar a fondo el comportamiento horario de los niveles de iluminancia (lux) será necesario para comprender mejor el UDI mensual.

Los parámetros de PS exterior y distancia a ventanal, son complementarios y puede ser sustituido uno con respecto al otro, al limitar la radiación solar directa en la planta.

Para implementar un PS, se requiere de analizar el entorno constructivo inmediato del espacio interior en el que se quiere optimizar. Combinarlo con otras estrategias pasivas como el incremento del valor U (w/m^{2}K) o la ventilación natural, puede mejorar los atributos del PS e incrementar las horas dentro de los rangos óptimos.

La OMO es una herramienta estadística útil para gestionar el cumplimiento de objetivos de manera simultánea para diseñar estrategias pasivas en la arquitectura. Facilita el análisis de datos, manteniendo mayor claridad en la complejidad de los sistemas en un espacio construido.

7. Acrónimos

AAC. Agricultura de ambiente controlado

ACA. Agricultura de campo abierto

CDMX. Ciudad de México

EPW. Energy Plus Weather

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GV. Granja vertical

HB. Honeybee

HB-E. Honeybee Energy

HB-R. Honeybee Radiance

HR. Humedad relativa (%)

HVAC. Sistema activo de aire aconidcionado/calefacción

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INV. Invernadero

LBtools. Ladybug tools

MAE. Error medio absoluto

OMO. Optimización Multiobjetivo

PIB. Producto Interno Bruto

PS. Parasol

SIA. Sistema de iluminación artificial

SIM. Simulación

Tbs. Temperatura bulbo seco (°C)

UDI. Iluminancia útil de luz de día (% de horas)

ZMVM. Zona Metropolitana del Valle de México

AO. Organización de las Naciones

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores no utilizaron Inteligencia Artificial. Todo el contenido fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. José Diego Morales Ramírez, Dra. Ilse García Villalobos y a la Dra. Juana Isabel Méndez Garduño por su apoyo y orientación en esta investigación.

Referencias

ARUP, C40 & University of Leeds (2019). *The Future of urban consumption in a 1.5°C world.* Disponible en: Disponible en: https://mexico.un.org/es/239254-informe-sobre-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-2023-edici%C3%B3n-especial [2026, 10 de Abril].

ASHRAE Research (2021). 2021 ASHRAE Handbook Fundamentals SI Edition. ASHRAE. Georgia, Estados Unidos.

Benis, Khadija; Reinhart, Christoph; Ferrao, Paulo (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal; MIT, Boston EU: Journal of Cleaner Production 147.

Despommier, Dickinson (2023). The New City: how to build our sustainable urban future. Columbia University Press. Nueva York, Estados Unidos.

Eaton, M., Shelford, T., Cole, M., & Mattson, N. (2023). Modeling resource consumption and carbon emissions associated with lettuce production in plant factories. Journal of Cleaner Production, 384, 135569. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135569

Ellen McArthur Foundation (2019). *Ciudades y Economía Circular de los Alimentos*. Ellen MCArthur Foundation. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/ciudades-y-economia-circular-para-la-alimentacion [2024, 9 de Mayo].

Engler, N., & Krarti, M. (2021). Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *141*, 110786. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110786

Estrada Porrúa, Francisco (2026). *Desde 2012, en México casi se ha duplicado la tasa de calentamiento.* Disponible en: https://www.gaceta.unam.mx/desde-2012-en-mexico-casi-se-ha-duplicado-la-tasa-de-calentamiento/ [2026, 10 de Abril].

FAO (2025). Disponible en: https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/greenhouse-gas-emissions-from-agrifood-systems.-global--regional-and-country-trends--2001-2023/en [2026, 1 de Mayo].

García, Enriqueta (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.* UNAM. Serie Libros. Disponible en: http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83 [2024, 10 de Septiembre].

González, V.G., Bandera, C.F. A building energy models calibration methodology based on inverse modelling approach. *Build. Simul.* **15**, 1883–1898 (2022). https://doi.org/10.1007/s12273-022-0900-5

Goto, Eiji. (2016). Production of Pharmaceuticals in a specially designed Plant Factory. Matsudo,Japón:Universidad de Chiba. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00015-9

Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. Agricultural Systems, 153, 138-147. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003

Graamans, L., Baeza, E., Van Den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural systems*, *160*, 31-43. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

Kreuger, M., Meeuws, L., Meeuws, G. (2018). Applications for Breeding and High-Wire Tomato Production in Plant Factory. In: Kozai, T. (eds) Smart Plant Factory. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_18

Noorzai, E., Bakmohammadi, P., & Garmaroudi, M. A. (2023). *Optimizing daylight, energy and occupant comfort performance of classrooms with photovoltaic integrated vertical shading devices.* Architectural Engineering and Design Management, 19(4), 394-418. https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2080173

Orsini, F; Pennisi, G; Zulfiqar, F; Gianquinto, G (2020). *Sustainable Use of Resource in Plant Factories with artificial lighting (PFALS)*. Boloña, Italia. https://dx.doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1

Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar energy*, *44*(5), 271-289. https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H

Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Graf, P. y Cattin, R. (2020). *Meteonorm* (Versión 8.0.2). Meteotest AG. [https://mn8.meteonorm.com/en/meteonorm-version-8]

Rojas Martínez, Agustín; Torres Torres, Felipe (2019). *Suelo agrícola en México: retrospección y retrospectiva para la seguridad alimentaria*. Ciudad de México, México; Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía vol 9 núm 3. Disponible en: https://rde.inegi.org.mx/index.php/2019/01/25/suelo-agricola-en-mexico-retrospeccion-prospectiva-la-seguridad-alimentaria/ [2026, 9 de mayo].

Salem Bahdad, A. A., Syed Fadzil, S. F., Onubi, H. O., & BenLasod, S. A. (2022). *Balancing daylight in office spaces with respect to the indoor thermal environment through optimization of light shelves design parameters in the tropics*. Indoor and Built Environment, 31(7), 1963-1985. https://doi.org/10.1177/1420326X221086537

SEDATU,CONAPO,INEGI (2020). *Metrópolis de México 2020*. Ciudad de México, México: SEDATU. Disponible en: https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published [2026, 4 de Mayo].

Ward, Rebecca; Jans-Singh, Melaine; Choudhary, Ruchi (2018). *Quantifying the Environmental and Energy Benefits of Food Growth in the Urban Environment*. Singapur: Smart Plant Factory. The next generation indoor vertical farms. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_17