

Simulaciones Energéticas de Azoteas Verdes con Germinados de Lenteja: Evaluación Sistémica del Confort Térmico en Entornos Residenciales

Nombre: Juana Isabel Méndez

Institución: ¹Tecnológico de Monterrey, Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., México, 64700

² Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., México, 64700

Email: isabelmendez@tec.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5337-2527>

Nombre: Claudia Hernández-Aguilar

Institución: ³Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, SEPI- Programa de Posgrado en Ingeniería de sistemas. Sistemas de ingeniería, Sistemas Biofísicos. Av. Instituto Politécnico Nacional, 07738, Ciudad de México, México

Email: clhernandez@ipn.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0952-1510>

Nombre: Arturo Domínguez-Pacheco

Institución: ³Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, SEPI- Programa de Posgrado en Ingeniería de sistemas. Sistemas de ingeniería, Sistemas Biofísicos. Av. Instituto Politécnico Nacional, 07738, Ciudad de México, México

Email: fdominguezp@ipn.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3561-7257>

Resumen— Este trabajo analiza el potencial de la lenteja como cubierta verde en azoteas de viviendas mexicanas para mejorar el confort térmico adaptativo sin utilizar sistemas de climatización. Se seleccionaron nueve localidades con climas diversos (La Paz, Progreso, Quintana Roo, Los Mochis, Puerto Peñasco, San Cristóbal, Ciudad Juárez, Ciudad de México y Querétaro) y se compararon dos escenarios en cada una mediante simulaciones energéticas en EnergyPlus: (1) azotea libre y (2) azotea con sustrato y vegetación de lenteja. Se evaluó el porcentaje de horas de confort adaptativo con base en la Norma ASHRAE 55 al 80% de aceptabilidad. La prueba estadística de Friedman ($\chi^2 = 25.296$, $p < 0.05$) y el test post hoc de Nemenyi confirmaron diferencias significativas entre espacios interiores. El baño, con menor área y carga interna, presentó cambios más sensibles que la cocina o la sala-comedor ($p < 0.05$). Los resultados muestran que, en climas cálidos, la azotea verde de lenteja incrementa las horas de confort entre 5 y 25 puntos porcentuales, gracias a la menor ganancia térmica y al efecto de transpiración de la planta. Sin embargo, en zonas templadas o con inviernos marcados, la reducción de radiación solar puede disminuir el confort si no se implementan estrategias adicionales. Las simulaciones energéticas sugieren que el cultivo de germinados en azotea favorece a la sostenibilidad urbana al combinar enfriamiento pasivo con la producción de alimentos a pequeña escala. Se concluye que la implementación de cubiertas verdes basadas en lenteja resulta viable en regiones cálidas, mientras que en entornos fríos requiere de enfoques complementarios. Se recomienda validar experimentalmente estos hallazgos, tomando en cuenta factores de riego y mantenimiento.

Abstract— This study analyzes the potential of lentil as a green roof solution for Mexican homes to improve adaptive thermal comfort without relying on air conditioning systems. Nine locations with diverse climates (La Paz, Progreso, Quintana Roo,

Los Mochis, Puerto Peñasco, San Cristóbal, Ciudad Juárez, Mexico City, and Querétaro) were selected, and two scenarios were compared in each one using energy simulations in EnergyPlus: (1) a bare rooftop and (2) a rooftop with lentil-based substrate and vegetation. The percentage of adaptive comfort hours was evaluated based on the ASHRAE 55 Standard at an 80% acceptability level. Friedman's statistical test ($\chi^2 = 25.296$, $p < 0.05$) and the Nemenyi post hoc test confirmed significant differences between interior spaces. The bathroom, with a smaller area and lower internal load, exhibited more pronounced changes than the kitchen or living-dining room ($p < 0.05$). Results indicate that, in warm climates, the lentil green roof increases comfort hours by 5 to 25 percentage points due to reduced thermal gains and the plant's transpiration effect. However, in temperate areas or those with pronounced winters, diminished solar radiation can negatively affect comfort unless additional strategies are implemented. The bathroom, with smaller area and internal load, exhibited more pronounced changes compared to the kitchen or living-dining room. Furthermore, energy simulations suggest that rooftop germination promotes urban sustainability by combining passive cooling with small-scale food production. It is concluded that the implementation of lentil-based green roofs is feasible in hot regions, whereas complementary approaches are needed in colder settings. Experimental validation of these findings is recommended, considering irrigation and maintenance factors.

Palabras Clave — azoteas verdes con germinados, confort adaptativo, lenteja en azoteas, viviendas mexicanas.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano ha intensificado el efecto de isla de calor (UHI), viéndose reflejado en temperaturas más elevadas en

entornos densamente edificados, como el caso de Chennai en India, en donde se observó que la temperatura superficial en techos podían alcanzar hasta 45°C en días de calor extremo [1]. Esta situación, además de incrementar la demanda de energía para enfriar los espacios interiores, repercute negativamente en la calidad de vida y el confort térmico de los habitantes.

En respuesta, los jardines en azoteas han cobrado relevancia como estrategia de enfriamiento pasivo para estabilizar las temperaturas interiores y contrarrestar la UHI [2]. Su implementación puede reducir la temperatura superficial de la cubierta y, en consecuencia, mejorar el confort térmico adaptativo de los ocupantes, el cual reconoce la capacidad de las personas para adaptarse a fluctuaciones térmicas cuando tienen control sobre la ventilación y la vestimenta (ASHRAE Standard 55) [3]. Se ha reportado que en con una cobertura total de techo con vegetación, la temperatura interior puede disminuir entre 4 °C y 11 °C con dicha vegetación, alcanzando hasta 14–15 °C en configuraciones muy favorables [1].

En México, la ausencia de sistemas de climatización en muchas viviendas y la carencia de aislamiento térmico, que supera el 85% en zonas extremadamente calientes y 98.5% en regiones templadas y tropicales [4] refuerzan la necesidad de soluciones pasivas. El uso de plantas específicas en los jardines de azotea puede influir en la eficiencia térmica y en la resiliencia del ecosistema urbano. Por ejemplo, el cultivo de lentejas (*Lens culinaris*) en estos entornos ha demostrado adaptabilidad a temperaturas variables y niveles de humedad, lo que sugiere su potencial para contribuir al enfriamiento pasivo y la sostenibilidad agrícola en entornos urbanos [5].

La mayoría de estos estudios se han realizado con vegetación comúnmente usada en azoteas verdes, como pastos o plantas crasas. En este trabajo se investigará el potencial de la lenteja como una alternativa para cubiertas verdes en edificaciones de México, aprovechando sus características físicas y fisiológicas para mejorar el confort térmico de las viviendas. Su sistema radicular poco profundo se ajusta a las restricciones de espesor del sustrato en cubiertas verdes y permite una transpiración efectiva que estabiliza el microclima [6]. Así, el uso de lenteja podría mejorar también el confort térmico adaptativo de los ocupantes, al reducir la temperatura interior bajo distintas condiciones climáticas.

Para evaluar estos efectos, las simulaciones energéticas permiten analizar el comportamiento térmico de la vivienda y cuantificar el impacto de la cubierta verde en la reducción de temperaturas y mejora del confort. Por ejemplo, en esta investigación se realizaron simulaciones energéticas que muestran una reducción de temperatura interior de 4 a 11 °C con cubiertas verdes, y hasta 14 °C con sustrato homogéneo y vegetación densa [1].

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

A. Selección de ubicaciones

Con el fin de evaluar la incidencia de la cubierta vegetal sobre el confort térmico adaptativo en distintos climas de México, se retomaron nueve ubicaciones previamente

estudiadas [7]: La Paz, Progreso, Quintana Roo, Los Mochis, Puerto Peñasco, San Cristóbal, Ciudad Juárez, Ciudad de México y Querétaro. Dichas localidades representan regiones “extremadamente calientes”, “cálidas” y “templadas” según la clasificación combinada de ASHRAE, cubriendo así un espectro amplio de condiciones ambientales [4]. La Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) en su encuesta detectó que en el norte del país el 85% de las viviendas no cuentan con aislamiento térmico, mientras que en el resto del país se eleva a un 98.5% de viviendas que se caracterizan por la falta de aislamiento térmico en la mayoría de las viviendas así como por la ausencia de sistemas de climatización activa [4].

B. Características de la vivienda modelo

La investigación se centró en una vivienda de un nivel, con aproximadamente 69 m² de superficie, construida a partir de muros de bloque sin aislamiento, ventanas con acristalamiento simple y un techo plano de concreto reforzado revestido con mortero. Se prescindió de cualquier sistema de calefacción o refrigeración mecánica para centrarse en la respuesta térmica pasiva. Esta configuración representará un tipo constructivo común en México, tal como se muestra en la Figura 1.

El perfil de ocupación y uso de equipos se estableció a partir de datos de la ENCEVI [4], suponiendo la presencia de dos personas, una de ellas dedicada a labores de home-office [7]. Se contemplaron horarios de uso para actividades cotidianas (cocina, electrónicos, iluminación) y ventilación natural intermitente por la apertura de ventanas.



Figura 1.- Casas duplex de un solo nivel comunes en México.

C. Escenarios de estudio

El estudio comparó dos situaciones principales. El primer escenario correspondió a la vivienda base, esto es, sin ninguna intervención en la cubierta; el segundo agregó la cubierta verde.

- Escenario de referencia (sin techo verde, es decir, azotea libre): La cubierta se mantiene con sus materiales originales (concreto reforzado y mortero), sin aislamientos ni vegetación.
- Escenario con techo verde: Se incorporó un sustrato con propiedades térmicas definidas de la lenteja (conductividad de 0.35 W/m·K, densidad de 1100 kg/m³ y capacidad calorífica de 1200 J/kg·K) sobre membranas impermeables y geotextiles. Las propiedades declaradas para la capa

vegetal incluyeron altura de 0.30 m, índice de área foliar de 2.9, reflectividad de 0.22 y emisividad de 0.9 [8].

D. Simulación energética y confort adaptativo

La Guía 14 de ASHRAE [9] proporciona una metodología estandarizada para calibrar modelos de simulación energética, de tal modo que las predicciones se alineen con los datos de consumo del edificio real. Este proceso se realiza mediante la comparación de los resultados del modelo con datos reales, como facturas de servicios públicos o mediciones in situ, y ajustando parámetros del modelo hasta que se alcancen criterios de aceptación específicos.

Un modelo energético calibrado en una ubicación específica puede adaptarse para evaluar el desempeño en otras localidades al modificar datos climáticos o características constructivas locales [10]. Estos modelos permiten evaluar nuevas ideas y analizar su impacto desde las primeras etapas del diseño conceptual. Estas herramientas de simulación calculan las cargas térmicas y el consumo energético en edificaciones, facilitando estudios comparativos [11].

Para analizar la vivienda en diferentes ubicaciones, se realizó un modelo energético base empleando EnergyPlus™ 23.1.0 a través del software de LadybugTools. Se utilizaron archivos climáticos (EPW) para cada localidad, incorporando datos de temperatura, humedad y radiación solar, así como la secuencia horaria de ocupación y la apertura/cierre de ventanas. Se consideraron cuatro zonas, el baño de 6 m², la cocina de 10.5 m², la sala-comedor de 42.2 m² y la habitación de 10.5 m², dando un total de 69.2 m². La Figura 2 muestra el modelo de la casa simulada considerando también el contexto.

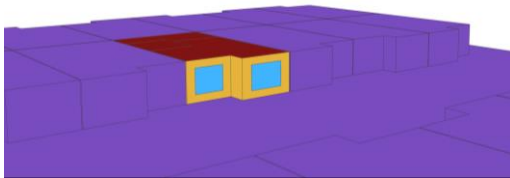


Figura 2.- Distribución general del entorno y modelado energético de la casa.

Con el fin de asegurar la validez numérica de los resultados, el modelo se calibró siguiendo la Guía 14 de ASHRAE [9]. Esta guía establece dos indicadores principales para evaluar el grado de ajuste entre datos medidos y simulados:

- El Error medio normalizado (NMBE), que debe mantenerse dentro de $\pm 5\%$ para considerarse aceptable.
- El Coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio (CV(RMSE)), que no debe superar $\pm 15\%$ (ASHRAE, 2014).

Para la calibración, se dispuso de datos de consumo energético de una vivienda real de un nivel en la Ciudad de México (Figura 1), con características constructivas y de ocupación similares a las simuladas. A partir de estos registros, se calcularon tanto el NMBE como el CV(RMSE), corroborando así la fiabilidad del modelo para posteriores análisis de confort adaptativo.

El confort adaptativo es un modelo que evalúa la sensación térmica de los ocupantes en función de la temperatura exterior y su capacidad de adaptación a las variaciones del entorno [12]. Este enfoque, respaldado por la Norma ASHRAE 55, parte del principio de que los individuos pueden modificar su vestimenta, ventilación y comportamiento para mantener su confort térmico sin necesidad de climatización activa [3]. Para determinar si la vivienda mantiene condiciones de confort adaptativo, ASHRAE 55 establece que puede haber un 80% o 90% de aceptabilidad, es decir un 20% o 10% de personas insatisfechas al interior de la vivienda o sin confort térmico.

Durante la simulación, se analizó la temperatura operativa interior en distintos periodos anuales, aplicándose el criterio de confort adaptativo según la Norma ASHRAE 55, que determina la aceptabilidad de la temperatura interior en función de la media móvil de la temperatura exterior. Dada la ausencia de sistemas HVAC, este criterio resulta idóneo para reflejar la capacidad de adaptación de los ocupantes ante fluctuaciones térmicas [7].

E. Análisis estadístico

Con el fin de determinar si existían diferencias significativas en los porcentajes de horas de confort entre las nueve condiciones evaluadas (Baño, Cocina, Sala-Comedor y Habitación, cada una con y sin techo verde), se aplicó la prueba no paramétrica de Friedman [10]. Este método permite comparar más de dos tratamientos cuando los datos proceden de mediciones repetidas o emparejadas; en este caso, cada ubicación se consideró como factor de emparejamiento. También se realizó un análisis post hoc con el test de Nemenyi, utilizando correcciones para comparaciones múltiples. Estas pruebas se implementaron en RStudio 2023.12.1 mediante el paquete PMCMRplus.

F. Análisis comparativo

Para valorar el efecto de la cubierta de lenteja en cada una de las localizaciones, se recopilaron y analizaron el porcentaje de horas en que dicha temperatura permaneció dentro del rango de confort adaptativo al 80%. Se determinó la diferencia de comportamiento entre la vivienda con techo convencional y la vivienda con techo verde, poniendo especial énfasis en:

- a) El cambio en la temperatura interior máxima y promedio durante las horas de mayor calor.
- b) El incremento o disminución en el porcentaje de horas de confort adaptativo.
- c) Las variaciones ligadas a la clasificación climática de la localidad (ASHRAE-ENCEVI) y la distribución regional.

Esta metodología permitió estimar en qué medida la cubierta verde con lenteja puede mejorar el confort térmico adaptativo en viviendas mexicanas sin climatización, y cuantificar la eficiencia de esta intervención en contextos climáticos diversos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Calibración del modelo

A partir de los datos medidos de consumo eléctrico, se realizó la calibración de vivienda para poder analizarla en

diferentes localidades, se obtuvo un consumo anual de 2,089 kWh, mientras que la simulación arrojó un valor de 2,278.97 kWh. Con estos valores, se calculó un NMBE de -0.15% y un CV(RMSE) de 10%. Dichas cifras se encuentran dentro de los rangos de aceptación establecidos por la Guía 14 de ASHRAE ($\pm 5\%$ para NMBE y $\pm 15\%$ para CV(RMSE)), por lo que el modelo puede considerarse adecuadamente calibrado.

B. Desempeño térmico y confort adaptativo

Una vez validada la confiabilidad del modelo, se simularon las condiciones interiores en las localidades seleccionadas (La Paz, Progreso, etc.). Los resultados de la Tabla 1 muestran el porcentaje anual de horas de confort adaptativo al comparar la configuración “Azotea libre” vs. “Con techo verde (lenteja)” en cuatro espacios de la vivienda (Baño, Cocina, Sala-Comedor y Habitación). La prueba de Friedman arrojó $\chi^2=25.296$ con 7 grados de libertad y un valor $p<0.05$, confirmando la existencia

de diferencias significativas. Posteriormente, el test de Nemenyi reveló que únicamente tres comparaciones resultaron estadísticamente diferentes ($p<0.05$):

- Cocina sin techo verde vs. Baño con techo verde.
- Sala Comedor sin techo verde vs. Baño con techo verde .
- Habitación sin techo verde vs. Baño con techo verde.

En otras palabras, el “Baño con techo verde” presenta un comportamiento claramente diferente al de la “Cocina sin techo verde”, la “Sala-Comedor sin techo verde” y la “Habitación sin techo verde”. Desde el punto de vista práctico, este hallazgo sugiere que la menor área del baño, su menor carga térmica interna y su configuración podrían amplificar la influencia de la cubierta de lenteja en la atenuación de la radiación solar y el control del calor, en contraste con otras zonas.

Tabla 1.- Confort térmico (%) considerando un 80% de aceptabilidad conforme al modelo de confort adaptativo del estándar ASHRAE-55.

Ubicación	Baño		Cocina		Sala-Comedor		Habitación	
	Sin techo verde	Con techo verde	Sin techo verde	Con techo verde	Sin techo verde	Con techo verde	Sin techo verde	Con techo verde
La Paz	51.83	63.11	46.76	60.00	43.37	59.90	52.40	65.11
Progreso	46.93	63.82	40.07	58.98	37.95	64.21	58.70	83.41
Quintana Roo	54.52	74.22	47.61	71.02	44.06	73.13	60.22	83.64
Los Mochis	55.15	62.77	51.32	59.95	50.87	60.86	52.66	62.42
Puerto Peñasco	50.27	55.76	46.34	53.04	48.88	57.25	43.15	48.77
San Cristobal	90.19	87.07	89.36	85.95	87.24	76.46	66.45	38.78
Juarez City	41.51	47.57	39.06	46.23	41.24	49.95	36.86	43.08
Mexico City	75.21	75.90	72.32	70.59	65.79	55.39	44.03	28.73
Queretaro	78.03	82.63	74.77	80.66	72.27	73.42	56.45	48.90

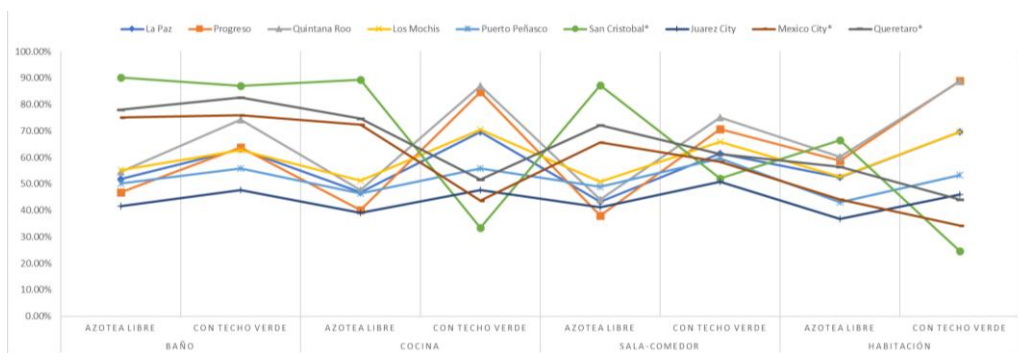


Figura 3.- Porcentaje de horas al año en confort adaptativo (ASHRAE 55) en cada localidad, comparando la condición “Azotea libre” (sin vegetación) y “Con techo verde” (lenteja) para los cuatro espacios: Baño, Cocina, Sala-Comedor y Habitación.

En la Figura 3 se observa una gráfica que muestra el porcentaje de horas al año en confort adaptativo bajo el estándar ASHRAE-55 en cada ubicación. Se puede observar que en

ubicaciones con clima predominantemente cálido (La Paz, Progreso, Quintana Roo, Los Mochis, Puerto Peñasco, Ciudad Juárez), la “Con techo verde” suele superar a la de “Azotea

libre”, revelando mejoras que van de 5 hasta casi 25 puntos porcentuales. Por ejemplo, Progreso registra incrementos notables en la sala (de 38 % a 64 %) y la habitación (de 59 % a 83 %), atribuidos a la capacidad de la vegetación para atenuar la radiación solar y disipar el calor (transpiración y evaporación).

En Los Mochis, aunque las alzas no son tan drásticas, la sala sube de 51 % a 61 %, evidenciando que el techo verde funciona aun en zonas de calor extremo no tan constante como en la costa. En Ciudad Juárez (clima desértico), el confort en la sala aumenta de 41 % a 50 %, confirmando el efecto de barrera térmica pasiva de la lenteja.

Por el contrario, en zonas templadas o frías (San Cristóbal, Ciudad de México y Querétaro), el techo verde reduce la ganancia solar necesaria en épocas frías, provocando caídas en el confort interior. En San Cristóbal, por ejemplo, la sala desciende de 87 % a 76 %, y la habitación baja de 66 % a 39 %. De igual modo, la Ciudad de México y Querétaro muestran una tendencia negativa en invierno o en periodos frescos. Estos hallazgos señalan que, aunque la cubierta vegetal atenúa el calor en climas cálidos, puede resultar desfavorable en climas con inviernos más marcados si no se incorporan estrategias adicionales de calefacción o control solar.

C. Diferencias entre zonas y causas posibles

Las variaciones en el confort térmico según cada zona pueden atribuirse a tres factores principales. Primero, la orientación y superficie de la habitación determinan cuánta radiación solar incide en muros y ventanas. Zonas como la sala-comedor, por ejemplo, suelen contar con áreas acristaladas más amplias, exponiéndose a un mayor nivel de radiación directa, lo que incrementa la carga térmica en horas de insolación intensa.

Segundo, la carga térmica interna difiere de un espacio a otro. La cocina concentra procesos de cocción y uso de equipos eléctricos, sumando calor interno que se ve más intensamente compensado por la azotea verde. Por el contrario, el baño, con un uso esporádico y superficie menor, registra cambios más súbitos cuando la temperatura global del techo disminuye.

Finalmente, la conexión entre espacios, la presencia de pasillos y la ubicación de ventanas influyen en cómo se transfiere o retiene el calor en el interior. Este conjunto de aspectos explica por qué, en el mismo inmueble, se observan resultados dispares entre zonas.

D. Interpretación global y recomendaciones

De manera global, la implementación de una azotea verde con lenteja destaca como una estrategia eficaz en climas de altas temperaturas, donde el incremento en las horas de confort puede llegar a oscilar entre 5 y 25 puntos porcentuales. La atenuación de la radiación solar y el efecto de transpiración vegetal se traducen en un enfriamiento pasivo notorio, mejorando sustancialmente la habitabilidad de la vivienda. Sin embargo, en zonas con inviernos marcados o clima templado, la cubierta verde puede obstruir la ganancia de calor solar necesaria en temporadas frías, lo que se traduce en una disminución del confort si no se implementan medidas adicionales de calefacción o control solar. Por otro lado, debe destacarse que las

simulaciones energéticas se basan en propiedades y supuestos definidos por la literatura. Si bien el modelo se calibró según la Guía 14 de ASHRAE, existe la posibilidad de que en la práctica real las condiciones de riego, fertilidad del sustrato o mantenimiento del techo verde difieran, afectando el desempeño final. Por ejemplo, en localidades como Ciudad Juárez, con inviernos muy fríos y veranos extremadamente calurosos, la vegetación podría sufrir estrés térmico o requerir cuidados adicionales, influyendo sobre su crecimiento y capacidad de sombreado/transpiración. Se sugiere validar experimentalmente las simulaciones mediante mediciones in situ de temperatura y confort térmico, a fin de comparar los resultados del simulador, así como ajustar parámetros como la densidad de vegetación, el espesor del sustrato o la gestión de la humedad. Este enfoque complementaría los resultados del modelo y permitiría un dimensionamiento más preciso de la azotea verde con lenteja en contextos específicos, mejorando la confiabilidad de la propuesta como alternativa de enfriamiento pasivo en México.

E. Relevancia de los germinados en un enfoque sistémico

Un aspecto adicional que cobra importancia es el uso de germinados, el cual no solo puede proveer de un microclima refrescante mediante la transpiración de las plantas, sino que también se inserta en una visión holística de la sustentabilidad urbana. Desde la perspectiva de pensamiento sistémico, su rápido ciclo de crecimiento y su adaptabilidad a la variabilidad climática favorecen un microclima estable, reducen el efecto isla de calor y proporcionan alimentos frescos a nivel doméstico. Al mismo tiempo, promueven la participación ciudadana en la siembra y el cuidado de los cultivos, fortalecen la resiliencia alimentaria y estimulan la biodiversidad en zonas urbanas densas. Por consiguiente, los germinados transforman espacios inertes de concreto en entornos productivos y multifuncionales, impulsando beneficios combinados de enfriamiento pasivo, educación ambiental y eficiencia energética, elementos clave para la sustentabilidad urbana.

IV. CONCLUSIONES

La viabilidad de la cubierta verde está fuertemente ligada a la realidad climática de cada localidad y a las características constructivas de la vivienda. En climas mixtos, resultaría recomendable una integración de sistemas complementarios (por ejemplo, paneles ajustables o ventilación selectiva) para contrarrestar la pérdida de ganancia térmica en invierno.

Bajo una perspectiva sistémica, la instalación de germinados no solo contribuye al confort térmico adaptativo, sino que incorpora dimensiones agrícolas y sociales al uso de la azotea. El crecimiento rápido y la tolerancia a distintas condiciones climáticas de especies como la lenteja facilitan su adopción en entornos urbanos, promoviendo la participación ciudadana y la educación ambiental a pequeña escala. Además, la revalorización de techos inactivos en espacios multifuncionales refuerza la sostenibilidad de las ciudades.

Por último, aunque la calibración del modelo según la Guía 14 de ASHRAE brinda una base sólida, se sugiere validar experimentalmente estos resultados, a fin de corroborar la eficacia real de la vegetación y optimizar así el desempeño del

techo verde como solución pasiva de enfriamiento en diversos contextos de México.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI) por su apoyo y financiamiento, que hicieron posible esta investigación. También reconocen al Tecnológico de Monterrey y al Instituto Politécnico Nacional por proporcionar recursos, instalaciones y orientación académica durante todo el proyecto. Los autores también agradecen el apoyo de los proyectos IPN y SIP.

REFERENCIAS

- [1] G. Visvanathan, K. Patil, Y. Suryawanshi, V. Meshram, y S. Jadhav, “Mitigating urban heat island and enhancing indoor thermal comfort using terrace garden”, *Sci Rep*, vol. 14, núm. 1, p. 9697, abr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60546-0.
- [2] J. Kim, S. Y. Lee, y J. Kang, “Temperature Reduction Effects of Rooftop Garden Arrangements: A Case Study of Seoul National University”, *Sustainability*, vol. 12, núm. 15, p. 6032, jul. 2020, doi: 10.3390/su12156032.
- [3] ASHRAE, “Norma 55 – Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana”. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [4] ENCEVI, “Mexico - Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018”. Consultado: el 10 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/495>
- [5] A. K. Singh, B. K. Mishra, V. Pandurangam, y J. P. Srivastava, “Growth, Physiology, Yield, and Yield Attributes of Lentil (*Lens culinaris Medikus*) with Reference to Abiotic Stresses”, en *Response of Field Crops to Abiotic Stress*, CRC Press, 2022.
- [6] GRDC, “Lentil - SECTION 6 PLANT AND GROWTH PHYSIOLOGY”. junio de 2018.
- [7] J. I. Méndez, L. Ibarra, P. Ponce, A. Meier, y A. Molina, “A static rooftop shading system for year-round thermal comfort and energy savings in hot climates”, *Heliyon*, vol. 10, núm. 11, p. e31599, jun. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31599.
- [8] N. An, S. Hemmati, y Y.-J. Cui, “Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, núm. 2, pp. 239–246, abr. 2017, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.10.004.
- [9] “ASHRAE Guideline 14-2023 -- Measurement of Energy, Demand and Water Savings”. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://store.accuristech.com/standards/ashrae-guideline-14-2023-measurement-of-energy-demand-and-water-savings?product_id=2569793&srsId=AfmBOopOGcy-CQfNVuWV4yOFi0hIsnD1VauzOHCAdx7VYOpcVmhbVr0Y
- [10] IBM, “Prueba de Friedman”. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/beta?topic=tests-friedman-test>