

Estimación del nivel de arborización para edificaciones en clima tropical: Enfoque estadístico y simulación dinámica

Tree Planting Level Estimation for Buildings in a Tropical Climate: Statistical Approach and Dynamic Simulation

Daniel Austin-Ortega¹, Dafni Mora^{1,2,3}, Miguel Chen Austin^{1,2,3,*}

¹ Grupo de Investigación en Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá 0819-07289, Panamá

² Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP), Ciudad de Panamá, Panamá

³ Sistema Nacional de Investigación (SNI), Clayton Ciudad de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.chen@utp.ac.pa

RESUMEN. El humano siempre ha buscado el confort en varios aspectos de su día a día, el confort térmico es uno de esos ya que afecta directamente el desempeño del mismo en actividades que realiza, puede mejorar, como empeorar estas actividades diarias. La búsqueda de confort térmico en los espacios donde convivimos, conlleva, en muchos casos a un consumo eléctrico desmedido por una mala planificación de diseño de la estructura donde habitamos, donde las altas temperaturas permanecen durante todo el día y nos obliga a usar equipos de aire acondicionado para lograr el confort térmico. En esta investigación buscamos aumentar la eficiencia energética de una edificación, disminuyendo las ganancias solares internas mediante simulaciones en DesignBuilder de diferentes escenarios que acoplan el uso de la arborización: un método pasivo amable con el ambiente el cual utiliza los árboles como barrera entre los rayos solares y la edificación con el índice de estructura verde, el cual toma en cuenta el patrón con el que se siembran los árboles para disminuir el consumo eléctrico de la edificación disminuyendo las temperaturas internas de la misma. Esto apoyado con otras técnicas de optimización que utilizan ciertos parámetros de construcción de la edificación, para sacarle un mayor provecho a la misma desde su diseño. El uso de la arborización ha demostrado ser eficiente para reducir el consumo eléctrico en edificaciones, principalmente cuando se utilizan para bloquear los rayos solares que inciden en las ventanas, que son la principal fuente de ganancias internas de temperatura.

Palabras clave. Arborización, confort, evapotranspiración, impacto térmico, índice de estructura verde.

ABSTRACT. Humans have always sought comfort in various aspects of their day to day, thermal comfort is one of those since it directly affects their performance activities they carry out, it can improve or worsen these daily activities. The search for thermal comfort in the spaces where we live, leads, in many cases, to excessive electrical consumption due to poor design planning of the structure where we live, where high temperatures remain throughout the day and force us to use air conditioning equipment to achieve thermal comfort. In this research we seek to increase the energy efficiency of a building, reducing internal solar gains through DesignBuilder simulations of different scenarios that combine the use of tree planting: an environmentally friendly passive method which uses trees as a barrier between solar rays and the building with the green structure index, which takes into account the pattern with which the trees are planted to reduce the electrical consumption of the building by lowering its internal temperatures. This is supported by other optimization techniques that use certain construction parameters of the building, to get more out of it from its design. The use of trees has proven to be efficient in reducing electricity consumption in buildings, mainly when they are used to block the sun's rays that fall on the windows, which are the main source of internal temperature gains.

Keywords. Arborization, comfort, evapotranspiration, thermal impact, green structure index.

1. Introducción

El ambiente se ve afectado por la producción de la energía que requerimos para nuestras actividades cotidianas, por eso el ámbito energético está tan ligado al ambiental. Los grandes cambios ambientales ocurridos durante el siglo XX son consecuencia del sistema energético, ya que requieren el uso de los combustibles fósiles, cuya combustión tiene efectos a nivel local y global [1].

En Panamá el 45.51% de la energía eléctrica es obtenida de procesos de combustión [2]. De la cual el 62% de esta se consume con fines de acondicionamiento y de refrigeración [3]. Lo que buscamos con este proyecto es evaluar el efecto o influencia que tiene la arborización en disminuir las ganancias térmicas recibidas por una edificación, que conlleve a la disminución de la temperatura interior, aumentando el confort interior, y del gasto eléctrico para el acondicionamiento del aire.

El método de arborización utiliza la plantación de árboles para crear una barrera entre la edificación y los rayos solares, lo que disminuye las ganancias de calor internas. La arborización aplicada correctamente, ayuda a disminuir el consumo eléctrico de una edificación, esta arborización nos permite llegar a un confort térmico de una forma más eficiente. En países tropicales húmedos como el nuestro donde las temperaturas son altas la mayoría del año, este método nos permite bajar las temperaturas externas e internas del edificio, disminuyendo la brecha entre la temperatura actual del edificio y la del confort térmico del usuario [4].

El método utilizado en esta investigación es un método pasivo, amable con el ambiente el cual ayuda a reducir las temperaturas internas de una edificación, principalmente mediante el bloqueo de los rayos solares. El objetivo es reducir las temperaturas internas para mejorar el desempeño energético de una edificación, ya que las personas, para buscar el confort térmico, que se define como el conjunto de condiciones que permiten al ser humano sentir bienestar y satisfacción con el medio [5], utilizan equipos de aire acondicionado para establecer condiciones ambientales, dentro de un volumen de control o espacio delimitado, que les da este confort.

El confort térmico interior está dado por los parámetros como: la temperatura del aire, la radiación térmica, la humedad, la velocidad del aire, así como

factores personales como la actividad física y el grado de aislamiento de la ropa [6].

1.1 Generalidades de la arborización

Arborizar significa llenar de árboles un determinado sitio, cuando se hace de forma planificada conlleva a una arborización urbana; una correcta arborización refleja la cultura y el grado de civilización de una ciudad, es uno de los elementos más importantes de su valorización porque promueve mejoras en la calidad de vida y torna el ambiente más agradable [7]. La arborización para que sea exitosa requiere que se tengan en cuenta diversas variables.

- La primera variable toma en cuenta el ¿por qué? Se está plantando el árbol, esto determinará el objetivo de la siembra.
- La segunda variable sería el sitio de plantación, ¿cuáles son las características del lugar de plantación? Y ¿cuáles son las dimensiones disponibles?
- La tercera variable hace referencia a la planta, toma en cuenta datos más específicos de la misma, sus características y requerimientos [8].

En áreas de mucho asoleamiento, una característica que necesitamos en un árbol es que tenga hojas perennes o duraderas; un árbol perenne es aquel que siempre mantiene el follaje, cada año solo mueren una parte de las hojas de este mientras que las más jóvenes subsisten. Al analizar las tres variables, se puede filtrar la selección del árbol apropiado para el sitio apropiado respetando los objetivos propuestos [8].

Al estar en la búsqueda de una especie de árbol que cumpla unas características determinadas para un buen proceso de arborización podríamos caer en la práctica del monocultivo que vendría siendo una especie vegetal que acapara la totalidad o la mayor parte del terreno cultivado en una región. Para evitar esto, la especie de árbol seleccionada debería ser principalmente nativa del país, ya que el introducir una especie nueva podría traer desventajas como la uniformidad, que destruye la renovabilidad del sistema ecológico total [9].

La arborización urbana es el manejo de los árboles para su contribución al bienestar fisiológico, sociológico y económico de la sociedad urbana. Tiene que ver con los bosques, otras agrupaciones menores de árboles y los árboles individuales presentes donde vive la gente [10].

La construcción y el diseño sin miras a la eficiencia energética y con una incorrecta planificación urbana y por ende una incorrecta arborización, causa un consumo de energía despilfarrador; esto por la búsqueda de confort de la gente, estos edificios construidos con materiales de aislamiento de mala calidad y una gestión ineficiente de los mismos contribuyen a crear islas de calor [11].

Al no tener en cuenta la importancia de los elementos naturales como la arborización, no se tiene en cuenta que los elementos físicos como las edificaciones, causan el aumento de las temperaturas en los grandes centros urbanos, creando el fenómeno de islas de calor [12]. Fenómeno que consiste en la acumulación del calor debido a diversos factores utilizados en la morfología urbana, como la gran cantidad de áreas pavimentadas, disminución de áreas verdes, altas densidades de construcciones y contaminación atmosférica [13].

La arborización además de los beneficios ambientales tangibles como reducción de: temperatura, contaminantes, polución acústica, entre otros [14] Posee beneficios sociales no tan tangibles, pero igual de importantes y estudiados como: reducción del crimen y la violencia, mejora en la salud mental y física, aumento de los valores de la propiedad y ayuda a la tener conciencia ecológica [15].

1.2 Programas de arborización: local e internacional.

La arborización en Panamá no tiene un enfoque científico detallado, la explican como un programa que nos permita cuantificar, mantener y monitorear el arbolado del distrito, de tal manera que se puedan medir su aporte al mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos, y disminuir los daños causados por la caída de árboles mediante las podas preventivas y el monitoreo continuo [16].

Colombia tiene un clima tropical y mantiene un promedio de temperatura anual de 27°C. El estado de Bucaramanga tiene registradas cincuenta y siete especies de árboles de las cuales el 58% son especies introducidas para su proceso de arborización [17]. Los primeros programas de arborización de la ciudad se adelantaron con dos especies nativas; además de una especie exótica que predomina en muchas ciudades colombianas de clima cálido.

Ecuador posee un clima templado y una temperatura promedio anual de 30°C y a diferencia de Colombia no posee un proceso de arborización complejo, sino que solo

posee una única área con estructura urbana; como ellos se refieren al desarrollo urbano sostenible o en nuestro caso arborización urbana y es el Parque Samanes que es parte del Área Nacional de Recreación Samanes [18].

Brasil tiene un clima tropical y una temperatura promedio anual de 30°C, en Brasil conocen la importancia de tener una buena arborización. Uno de los proyectos que tienen vigentes “Arborização Urbana” que lo explican como un programa de forestación urbana: un ejercicio de ciudadanía y sostenibilidad socioambiental; un programa que consolida acciones cotidianas realizadas, fomentando soluciones creativas con apoyo de la ciudadanía porque el mismo tiene un desarrollo sociocultural positivo para la misma [19]. La Universidad de Maranhão de este mismo país mediante un estudio sencillo donde se miden las temperaturas de diferentes superficies, llegaron a la conclusión de que las áreas con mayor vegetación y sombreado tienen menores temperaturas a las áreas pavimentadas, haciendo énfasis en la importancia de la planificación urbana [20].

La empresa alemana *Greencity Solutions* ha desarrollado el *City Tree*, un dispositivo que tiene un rendimiento medioambiental de 275 árboles plantados de manera tradicional y es capaz de reducir la huella anual de CO₂ hasta en 240 toneladas. Uno solo de estos módulos absorbe partículas finas de hasta 417 coches y equivale a 275 árboles urbanos plantados, pero solo conlleva 5% de los costos de estos y 99% menos de espacio, cada módulo es capaz de reducir la polución local en un 30% de un radio de 50m [21].

1.3 Influencia de la vegetación en el desempeño energético en edificaciones

Al empezar un proceso de arborización con el fin de utilizar sus beneficios con fines de reducción térmica, indirectamente aumentando el desempeño energético, se deben tomar en cuenta diferentes factores.

Cuando se escoge la especie para arborizar en la mayoría de los textos solo se quedan con las características visuales y espaciales del árbol. Aunque éstas son muy importantes, no se debe obviar el porcentaje de evapotranspiración del árbol que es la combinación de dos procesos: la evaporación de agua que ocurre sobre alguna determinada superficie y la transpiración que ocurre en las estomas de las plantas la cual; en esencia transforma el agua que es absorbida por las raíces en vapor [22].

Se ha tratado de cuantificar el impacto que tiene el fenómeno de la evapotranspiración en el ahorro energético, tratando de conocer con exactitud cuánto se modifica la temperatura en los alrededores de la edificación, ya que la disminución de esta temperatura determinará cuánta energía se puede ahorrar al disminuir la ganancia de calor del recinto por convección. Esto depende del volumen de agua que cierto árbol sea capaz de transpirar y la cantidad de masa evaporada en cierto tiempo.

En el Cairo se propuso un modelo que tiene como objetivo encontrar una configuración de vegetación lo suficientemente densa para mitigar la isla de calor urbano y ahorrar energía en edificios. Se aplicaron tres escenarios en simulaciones diferentes: uno con 30% más de árboles que la zona original, uno con 50% y otro con 30% y 70% más de hierba que la situación original. Entre los casos se compara la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura fisiológicamente equivalente con el programa DesignBuilder. Así, se encontró que a través de la adición de árboles y capas de hierba se reduce la temperatura del aire, esto se debe a dos fenómenos a la sombra y a la evapotranspiración durante el día y la noche [23].

Un modelo que aprovecha la sombra dada por una línea de árboles fue propuesto por la Universidad de Heriot-watt de Edimburgo. Este modelo mediante la simulación por computadora como lo haremos también en este caso, ya que las investigaciones a gran escala son caras y requieren mucho tiempo, y se requerirían las mismas edificaciones con diferentes casos a estudiar en la misma área. El objetivo de la simulación computacional es predecir en qué medida el consumo de energía para la calefacción de espacios de oficina se puede reducir mediante el uso de líneas de árboles que reducen la convección externa teniendo en cuenta que en este caso se quiere mantener el calor dentro de la edificación [24].

Un modelado de árboles urbanos con simulaciones dinámicas que vinculan la vegetación con la temperatura y calidad del aire urbano nos hablan de como las barreras vegetales pueden potencialmente afectar la calidad del aire urbano, funcionando como barreras entre las emisiones del tráfico y la población por deposición de los contaminantes en la vegetación. Pero también nos advierten que el impacto de los árboles en la calle es más complejo de lo que parece y que se necesita un diseño

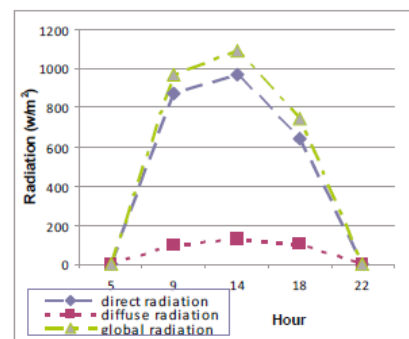
cuidadoso de las estructuras de vegetación para optimizar los beneficios y reducir las consecuencias no deseadas: se debe evaluar la salud de la vegetación, su altura, especie, densidad, distancia de la carretera, índice de densidad foliar que es la que está estrechamente relacionada con la dispersión de los contaminantes y la deposición de los mismos en la vegetación [25]. Otra consecuencia que se debe tener en cuenta es la disminución de la calidad del aire debido a la interacción de los árboles con el ambiente, ya que los árboles son sumideros o fuentes de contaminación porque funcionan como filtros para material particulado a través de la deposición de estas partículas en sus hojas, por eso no se deben colocar en áreas urbanas sin ninguna planificación [26].

Un modelado térmico del microclima urbano en la republica de Biskra sobre el impacto en la vegetación en las condiciones térmicas exteriores demuestra que, al analizar los efectos de la vegetación, las áreas sombreadas efecto de las mismas se encuentra que la temperatura del aire disminuye consecuencia de la disminución de la temperatura de la superficie. Proponen un escenario con la presencia de árboles y otro sin árboles (figura 1). La figura 2 (a y b) representan las diferencias entre diferentes tipos de radiación antes y después de la arborización.

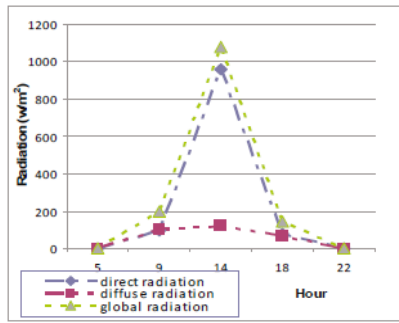


Figura 1. Tipos de distribución de árboles (Fi).

Fuente: Impact of vegetation on thermal conditions outside, Thermal modeling of urban microclimate, Case of study: the street of the republic, Biskra



(a)



(b)

Figura 2. Radiación directa, difusa y global: (a) antes y (b) después de la arborización.

Fuente: Impact of vegetation on thermal conditions outside, Thermal modeling of urban microclimate, Case of study: the street of the republic, Biskra.

Basándose en un modelo tridimensional ENVI-met, cuantificaron en tres niveles el impacto de la vegetación: cantidad de radiación térmica, temperatura del aire, humedad del aire y velocidad del viento.

El aumento de la vegetación provocó cambios profundos con respecto a la radiación solar incidente transmitido a la calle junto al jardín. La diferencia en la radiación entre el escenario con vegetación y sin vegetación son notorias, El flujo solar transmitido a el escenario sin árboles es alto en comparación con el escenario sin árboles. Debido a la sombra producida por los árboles la temperatura de la superficie disminuye y a medida que aumenta la cobertura vegetal aumenta el enfriamiento.

El lugar donde se llevó a cabo la simulación era un espacio denso. El agua en el suelo y la evapotranspiración ayudan a refrescar el aire.

La evapotranspiración de un árbol puede alcanzar hasta los 400 litros por día, lo que representa un efecto de enfriamiento equivalente a 5 unidades durante 20 horas. La humedad absoluta del escenario con vegetación es mayor a la del escenario sin vegetación. Se pueden observar una correlación inversa entre valore de humedad absoluta y los valores de temperatura del aire en esta área; lo que significa que un aumento de la temperatura del aire provoca una disminución de la humedad y viceversa [27].

2. Materiales y Métodos

La metodología de la investigación consistirá en una serie de pasos, que conllevarán a lograr el confort térmico dentro de la edificación con el menor consumo eléctrico

posible mediante las soluciones planteadas. Para lograr el confort térmico se tiene que tomar en cuenta una correcta arborización con el fin de buscar el mejor tipo de árbol y la mejor configuración de fi, esto da como resultado mayor área de la edificación cubierta por sombra y la disminución de la velocidad del viento para ayudar a la disminución de las ganancias solares externas e internas de la edificación y finalmente a la disminución del consumo eléctrico.

2.1 Descripción del caso de estudio

Para analizar los efectos que tiene la arborización sobre la edificación en términos de su consumo eléctrico, vamos a utilizar dos edificaciones diferentes con geometrías y comportamiento interno diferente. Cada edificación seguirá parámetros siguiendo las directrices de diseño propuestas por la Secretaría Nacional de Energía mediante el RES (Reglamento de edificación sostenible). A partir de la base de RES se configuraron los cerramientos de la edificación, tanto internos como externos, dentro de estos cerramientos se mencionarán características como el espesor, densidad, conductividad térmica, calor específico del material, entre otras [28].

Además de los parámetros del RES, como ya se había mencionado antes, para tener una correcta arborización se necesita una planeación, dentro de esta se toma en cuenta el patrón de sembrado de los árboles. Para estos casos de estudio la distribución de los árboles los mismos se colocarán en diferentes configuraciones, diferentes patrones de sembrado tienen diferentes influencias en el medio ambiente. Nos basaremos en el índice de estructura verde (Fi), que toma en cuenta el patrón de colocación de los árboles, un gran valor de Fi implica que las parcelas estarán lejos unas de otras. En la figura 3 podemos ver que el valor de Fi aumenta al adicionar más parcelas (cúmulo de árboles). Este índice refleja el grado de separación de la distribución del paisaje y se usa para estudiar la distribución de los árboles agregados en el microclima [29].

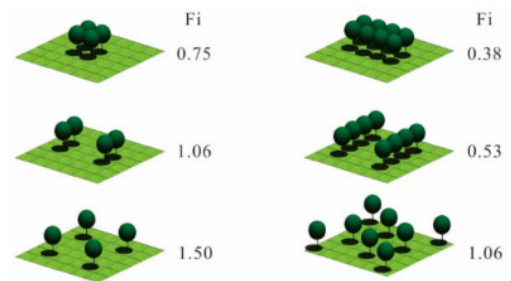


Figura 3. Tipos de distribución de árboles (Fi).

Fuente: The impact of green space layouts on microclimate and air quality in residential districts of Nanjing, China

2.2 Simulaciones

Para cada edificación se utilizaron cuatro índices de estructura verde diferentes, una de las edificaciones es un edificio departamental (figura 4: a, b, c y d) y la otra edificación es un edificio de oficinas (figura 4: e, f, g, h). Para el edificio de apartamentos se planteará cada escenario de diferente índice de estructura verde en dos modos, el modo pasivo y el modo mecánico. El modo pasivo de una edificación es aquel en el cual no se considera el uso de aires acondicionados para refrigeración de espacios, no se utiliza equipos para extraer el calor y llegar a una zona de confort por lo cual el diseño de la edificación debería ser suficiente para mantener cómodas a las personas en su interior. El modo mecánico de una edificación es aquel que utiliza equipos de refrigeración para mantener las condiciones internas del edificio acordes con el confort de la o las personas que residen en él [30].

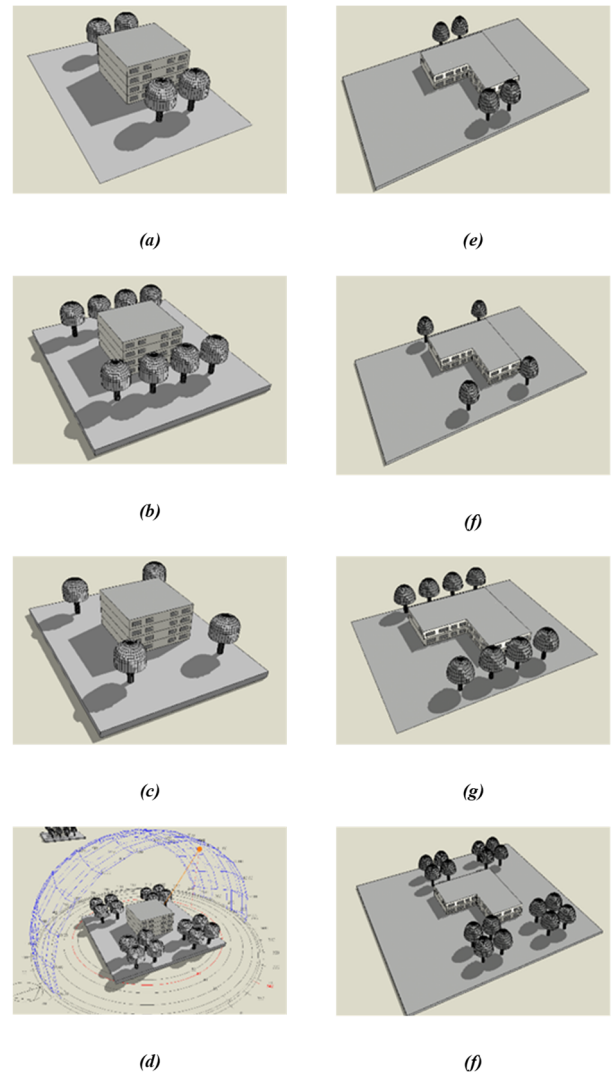


Figura 4. Escenarios de arborización para los edificios: (a)-Fi1 edificio de apartamento, (b)- Fi2 edificio de apartamentos, (c)-Fi3 edificio de apartamentos, (d)-Fi4 edificio de apartamentos, (e)-Fi1 edificio de oficina, (f)-Fi3 edificio de oficina, (g)-Fi2 edificio de oficina, (h)-Fi4 edificio de oficina. De arriba hacia abajo los Fi son: Fi1, Fi2, Fi3, Fi4 (11.05, 5.53, 15.64, 3.9).

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentarán los resultados de forma abreviada de los diferentes escenarios de simulación tanto para el edificio de apartamento como de oficina. Las figuras 5 y 6 ilustran los resultados del consumo eléctrico (luminarias, refrigeración, electrodomésticos) de los cuatro escenarios denotando la diferencia que hay entre diferentes configuraciones de índice de estructura verde.

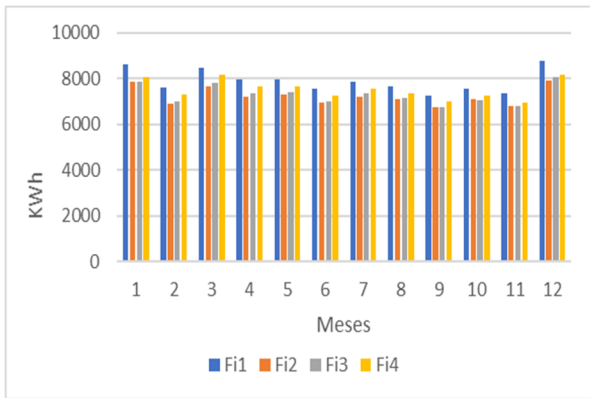


Figura 5. Consumo eléctrico edificio de apartamentos.

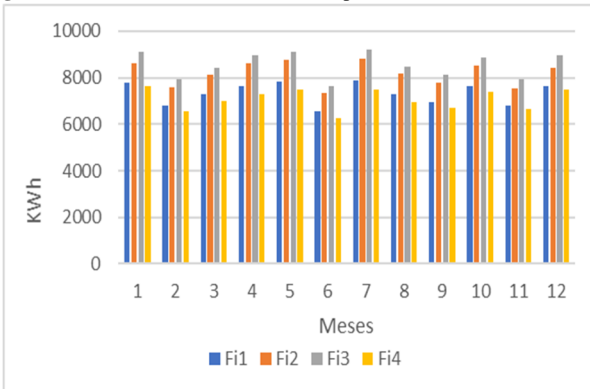


Figura 6. Consumo eléctrico edificio de oficinas.

La razón por la cual los escenarios que tienen la protección de los árboles a lo largo de la fachada con ventanas son los escenarios más eficientes (figura 4: b y h), se puede ver claramente representada en las siguientes figuras; las mismas ilustran la energía interna acumulada por ventanas (figuras 7 y 8) y por paredes (figuras 9 y 10), energía que por los diferentes mecanismos de transferencia de calor impactan y aumentan la temperatura interna de la edificación.

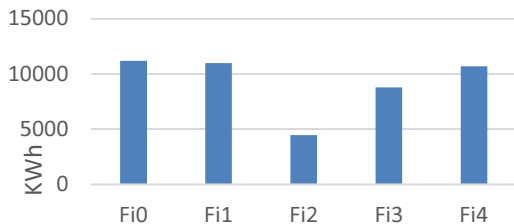


Figura 7. Ganancias solares anuales por ventana en el edificio de apartamentos.

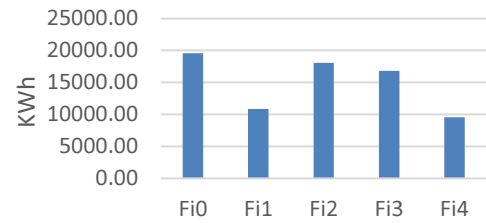


Figura 8. Ganancias solares por ventana edificio de apartamentos.

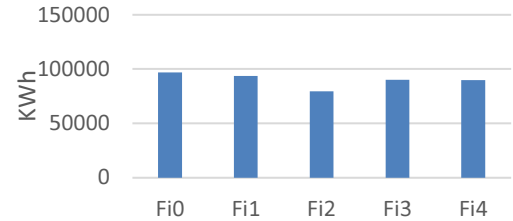


Figura 9. Ganancias solares por paredes edificio de oficinas.

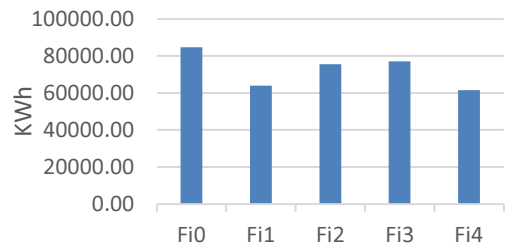


Figura 10. Ganancias solares por paredes edificio de oficinas.

3.1 Comparativa de consumo por refrigeración

En esta sección podemos apreciar la comparativa entre los consumos por refrigeración de cada escenario, en el edificio de apartamento y en el edificio de oficinas. Las figuras 11 y 12 comparan el consumo eléctrico de los diferentes escenarios en ambas edificaciones; podemos ver cuál escenario es el más eficiente en consumo eléctrico.

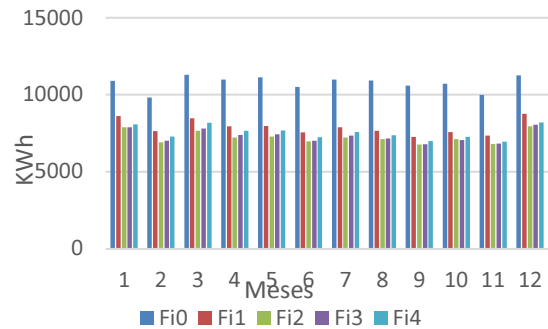


Figura 11. Comparativa entre los diferentes escenarios del edificio de apartamentos.

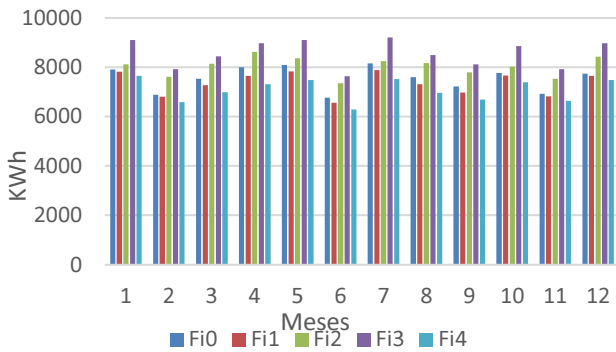


Figura 12. Comparativa entre los diferentes escenarios del edificio de oficinas.

En el edificio de apartamentos (figura 4: b) podemos observar que el Fi2 es el escenario más eficiente energéticamente. La finalidad de las simulaciones en los diferentes escenarios era probar: primero, que los árboles tienen un efecto térmico positivo en el ambiente y en los edificios circundantes en donde son plantados; segundo, demostrar que plantar los árboles con diferentes configuraciones o posiciones también perturba el efecto que tienen estos sobre el ambiente y sobre las edificaciones circundantes. En el edificio de oficinas (figura 4: h) el Fi4 tiene una geometría diferente y la distribución de los árboles está distribuida de una forma que cubre las ventanas y la fachada que más recibe radiación solar, lo que hace esta distribución y el escenario el más eficiente del edificio de oficinas. Todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Los árboles actúan como una barrera entre la energía de radiación incidente del sol y la superficie del edificio; la razón a la cual una superficie absorbe la radiación se da por la absorptividad de esta en conjunto con la razón de la incidencia de la onda.

3.2 Validación numérica: relación entre ganancias internas y arborización.

La arborización tiene beneficios como la reducción en temperaturas y la disminución del consumo eléctrico. La razón por la cual esto sucede es por el bloqueo de la radiación, mayor porcentaje de área cubierta por la sombra, significa menor impacto térmico que afecte a la edificación, lo cual se refleja en la disminución de las ganancias solares por techo y paredes, y a su vez, en la disminución de consumo eléctrico para refrigeración, este fenómeno causado por los árboles se puede predecir

a través de una ecuación proveniente de juntar los diferentes F_i y las ecuaciones provenientes de las regresiones lineales entre los valores de las ganancias solares de los escenarios arborizados y el escenario original sin árboles.

Para cada escenario se compararon las ganancias internas con las diferentes configuraciones de índice de estructura verde que se han estado utilizando a lo largo del estudio, así como también el porcentaje de error de la regresión lineal y se presentan las gráficas con las regresiones y sus diferentes ecuaciones propias del gráfico. Después de graficar las ganancias solares del escenario con árboles y el escenario sin árboles, mediante una regresión lineal entre ambas (figuras 13, 14, 15 y 16), utilizando la ecuación resultante (1) en donde se multiplica lo que llamaremos el factor de sombreado que se define como: la tasa de pérdida de radiación de la estructura con árboles con respecto a la estructura sin árboles (el cual nos indicará cuanto será la disminución de las ganancias solares), por el valor de la ganancia solar del escenario sin árboles; el error entre estos dos valores aparecerá en la tercera columna. Para cada escenario con un índice de estructura verde diferente se encontró un factor de sombreado propio a cada uno, una regresión lineal entre estos diferentes f_s (figura 17) nos permitió encontrar una línea de tendencia la cual su ecuación ayudará a calcular siempre un factor de sombreado para futuros F_i , sin tener que tomar en cuenta los cálculos geométricos de proyección de sombra de cada árbol sobre la edificación.

La Tabla 1 posee los valores correspondientes a cada escenario estudiado y el porcentaje de error está representado en la cuarta columna.

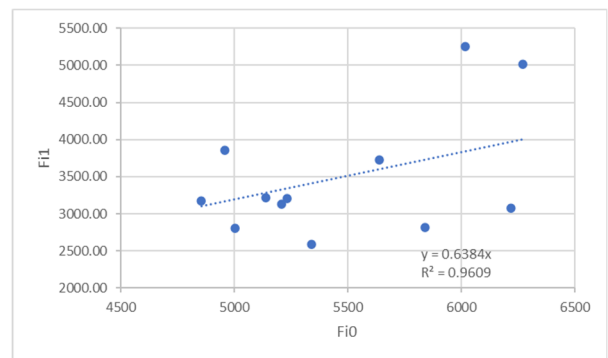


Figura 13. Regresión lineal Fi1.

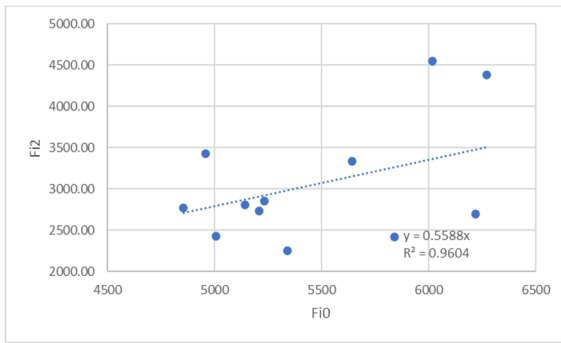


Figura 14. Regresión lineal Fi2.

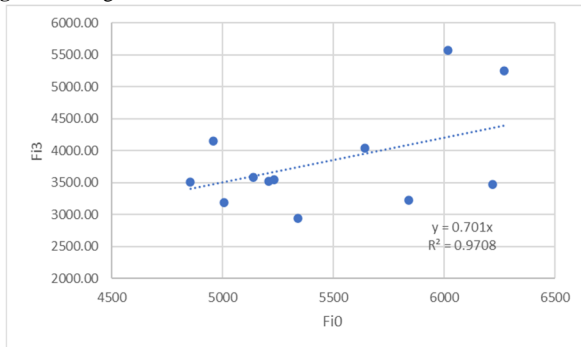


Figura 15. Regresión lineal Fi3.

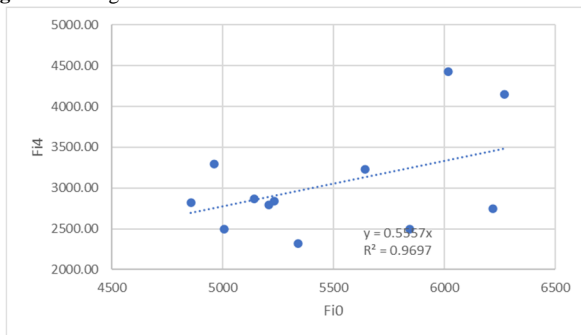


Figura 16. Regresión lineal Fi4.

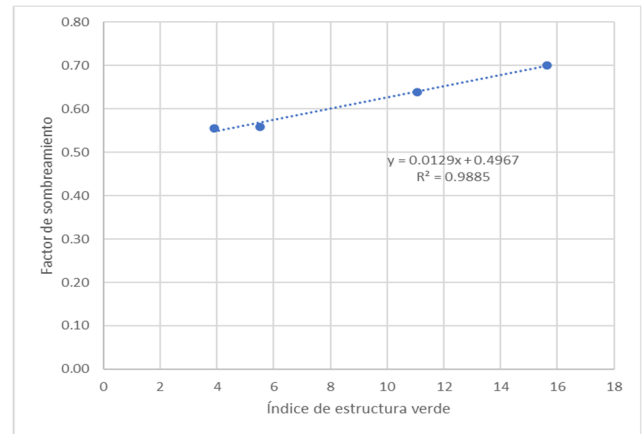


Figura 17. Regresión lineal entre factores de sombreado.

La siguiente ecuación (1) es la conclusión en la búsqueda de una forma de asociar el índice de estructura verde y la disminución de las ganancias solares internas. La reducción de las ganancias térmicas internas de la edificación da como resultado la disminución el consumo eléctrico por refrigeración para alcanzar el estado de confort.

$$f_s = 0.0129 F_i + 0.4967;$$

$$R^2 = 0.9885; p\ value = 0.005753; er = 0.93\% \quad (1)$$

donde: f_s : también llamada factor de sombreado que es proporcional a la reducción de las ganancias solares. Este término nos dice cuanto serán la reducción de las ganancias solares de la edificación con cierto F_i o arreglo de árboles. F_i : es el índice de estructura verde seleccionado (F_i), que depende de la cantidad de árboles que se puedan sembrar que, a su vez, depende del espacio disponible y de la configuración seleccionada. Este modelo está delimitado a una sola orientación y a que los árboles deben estar en las fachadas con ventanas. Para la validación del modelo se usaron dos índices de estructura verde diferentes a los antes simulados para demostrar la efectividad del método que se está proponiendo. La Tabla 2 tiene los valores de número de árboles e índice de estructura verde que son los datos o las preferencias que puede variar el que está diseñando el modelo según el espacio que se tiene y el arreglo que se quiera hacer. la primera columna muestra la cantidad de árboles y la segunda el posible arreglo que se puede hacer con estos árboles. Las figuras 18 y 19 ilustran los modelos utilizados en orden igual a la Tabla 2.

Tabla 1. Factores de sombreado encontrados

Cantidad de árboles	F_i	f_s	% error de la regresión
4	11.05	0.64	0.13
8	5.53	0.56	1.65
4	15.64	0.70	0.36
16	3.9	0.56	1.56

Tabla 2. Datos de los escenarios para validar el modelo

Escenario	Cantidad de árboles	Índice de estructura verde (Fi)
Fi5	24	1.84
Fi6	3	18.05

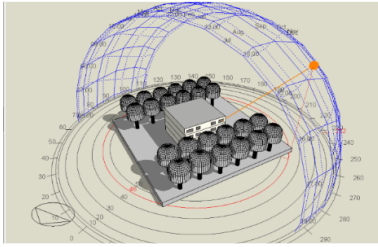


Figura 18. Escenario Fi5 del edificio de apartamentos para validación del modelo.

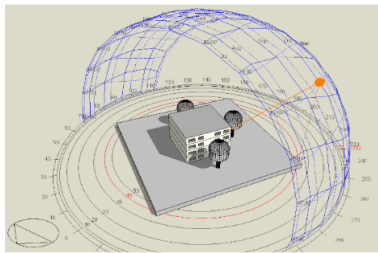


Figura 19. Escenario Fi6 del edificio de apartamentos para validación del modelo.

3.3 Ganancias solares

Después de plantear los escenarios con los que se trabajaría la validación del modelo propuesto, se simularon para comparar las ganancias solares internas con las ganancias solares del escenario sin árboles.

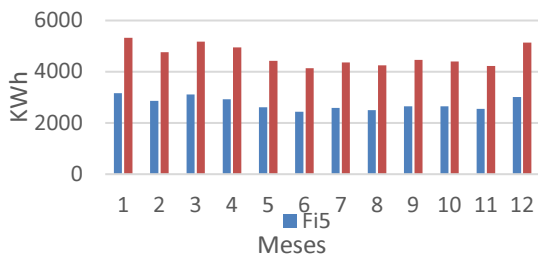


Figura 20. Ganancias solares de ambos escenarios para la validación del modelo.

La figura 20 ilustra las ganancias solares de las simulaciones de los escenarios propuestos para la validación del modelo. En las figuras 21 y 22 se representan las regresiones lineales entre las ganancias solares del escenario con árboles y sin arborizar.

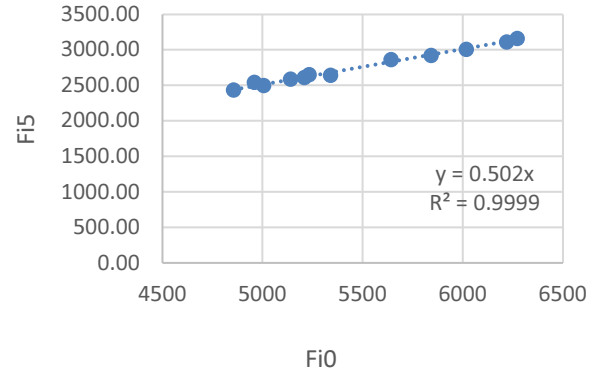


Figura 21. Regresión lineal del % de error del primer escenario de validación.

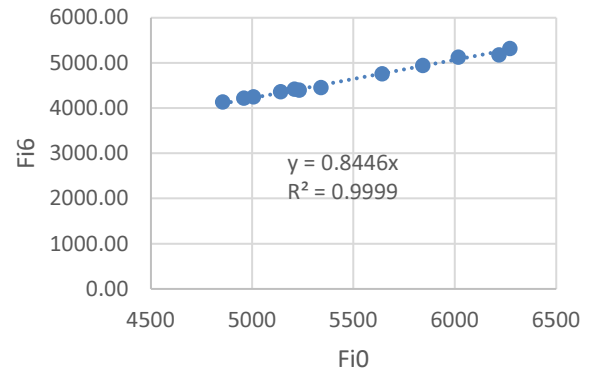


Figura 22. Regresión lineal del % de error del segundo escenario de validación.

Por último, la Tabla 3 posee el número de árboles en la primera columna; en la segunda, el arreglo del índice de estructura verde utilizado; en la tercera, el factor de sombreado encontrado al obtener la pendiente de la regresión lineal entre los valores de las ganancias solares entre el escenario sin árboles y el escenario con árboles; la cuarta columna es el valor obtenido al utilizar la ecuación obtenida y un valor de Fi asignado, lo cual nos dará un factor de sombreado para utilizar; por último, el porcentaje de error entre el factor de sombreado obtenido con regresiones lineales y el factor de sombreado conseguido con la ecuación.

Tabla 3. Factor de sombreado encontrado con la ecuación y el % de error al compararla con el de la regresión de su simulación

Cantidad de árboles	Fi	Factor de sombreado estimado con regresión	Factor de sombreado calculado con la ecuación	% error de la regresión entre el valor esperado y el calculado
24	1.84	0.50	0.520436	3.67
3	18.05	0.84	0.729545	13.62

El utilizar la ecuación como medio para calcular un factor de sombreado, que, al multiplicarlo por los valores iniciales de ganancias solares de la edificación, se obtienen los valores de disminución de ganancias solares por sombreado de cualquier Fi planteado, sin la necesidad de hacer cálculos geométricos o simulaciones en costosos softwares.

3.4 Discusión

En esta sección de este último capítulo se comentarán y compararán los resultados obtenidos con otras literaturas, las cuales han sido referencias para la misma. Los resultados han sido satisfactorios, cumpliendo con el desarrollo de los objetivos planteados para esta investigación. Como ya pudimos observar anteriormente los árboles ayudan de manera positiva a la disminución del consumo eléctrico de la edificación. La figura 23 muestra las ganancias solares de cada escenario, cada mes, donde se puede observar el contraste en comparación con el escenario sin árboles (Fi0).

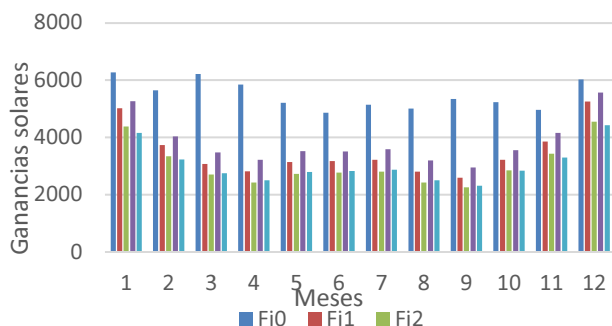


Figura 23. Ganancias solares.

Si comparamos estos resultados con los de la figura 2, a y b se pueden observar reducciones parecidas en las

condiciones de la edificación y circundantes. Estas investigaciones toman en cuenta solo un factor a la hora de estudiar el impacto, ya sea solo la presencia de árboles y arbustos sin una configuración aparente; esto en muchos casos no es posible ya que no se tomaron en cuenta métodos pasivo de ahorro energético en el diseño de la edificación por lo que no se cuenta con un vasto espacio para la técnica, por lo mismo el índice de estructura verde elimina tanto la variable de espacio disponible como los cálculos de la geometría de sombra que proyectan los árboles, haciendo el estudio más rápido, más eficiente y con menos requerimientos previos del terreno.

4. Conclusiones

A través de comparativas entre los resultados de las simulaciones obtenidas con el software DesignBuilder, el cual desglosa los consumos eléctricos y las ganancias solares internas de todos los componentes de la edificación mes a mes, podemos concluir que:

- La arborización como método pasivo es una forma eficiente de mejorar el desempeño energético de una edificación.
- Mayor cantidad de árboles no significa mejor factor de sombreado, ni mayores beneficios de reducción de consumos eléctricos.
- Ya que las mayores ganancias internas de temperatura se dan a través de las ventanas, es mejor ubicar los árboles en las fachadas con las mismas.

Para estudios futuros se recomienda:

- Variar la distancia de los árboles a la edificación.
- Modificar la orientación de la edificación.
- Utilizar el programa ENVI-met para poder sumarle a los beneficios la evapotranspiración.
- Al simular en el software ENVI-met, cuantificar los beneficios de colocar hierbas y arbustos alrededor de la edificación.
- Simular a mayor escala, preferiblemente replicando algún área geográfica del país.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al grupo de investigación en Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB, <https://eceb.utp.ac.pa/>) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá. Igualmente, al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH,

<https://cihh.utp.ac.pa/>). Esta investigación fue financiada por la Institución Panameña Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) <https://www.senacyt.gob.pa/> bajo el proyecto con código FID18-056 y el Sistema Nacional de Investigación (SNI).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

D.A.: Redactor, investigador encargado de la experimentación. M.C.A.: Analista de Datos, conceptualización, corrección y experimentación. D.M.: Supervisión y obtención de fondos.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] M. Y. R. M. Folchi, "El consumo de energía fósil y la especificidad de la transición energética en América Latina, 1900-1930," p. 27, 1994, [Online]. Available: <http://www.helsinki.fi/iehc2006/papers3/Folchi.pdf>
- [2] S. Nacional and D. E. Energía, "El Mercado Eléctrico de la República de Panamá 31," 2018.
- [3] A. Solís, "El 62% de la energía eléctrica en Panamá se consume con fines de acondicionamiento, y de refrigeración. - Inf. General | Agencia de Noticias Panamá," Jul. 31, 2015. <https://anpanama.com/4093-El-62-de-la-energia-electrica-en-Panama-se-consume-con-fines-de-acondicionamiento-y-de-refrigeracion.note.aspx> (accessed Feb. 06, 2020).
- [4] C. Belén, L. Ruiz, S. Flores Larsen, and D. Hoyos, "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGETICA DE UNA DOBLE FACHADA VERDE PARA EL CLIMA DE LA CIUDAD DE SALTA," vol. 23, pp. 1–25, 2019.
- [5] Z. Variable and M. Propuesto, "Capítulo 5.," pp. 67–104.
- [6] M. Jenkins, "What is ASHRAE 55? Basics of Thermal Comfort | SimScale Blog," Nov. 02, 2022. <https://www.simscale.com/blog/2019/08/what-is-ashrae-55-thermal-comfort/> (accessed Feb. 12, 2020).
- [7] C. L. M. de Souza, V. de Moraes, and P. R. C. Landgraf, "Arborización Urbana: Una Situación En Campos Dos Goytacazes," *Biológicas & Saúde*, vol. 1, no. 1, pp. 60–69, 2011, doi: 10.25242/8868112011513.
- [8] A. A. Ojeda, F. Guajardo, and D. Simón, *Manual De Plantación De Árboles En Áreas Urbanas*, vol. 1. 2014. [Online]. Available: http://www.conaf.cl/cms/editorweb/institucional/Manual_de_Plantacion_de_Arboles_en_Areas_Urbanas.pdf
- [9] P. Granda, *Monocultivos de árboles en Ecuador*. 2006.
- [10] "Los Servicios Ambientales De La Arborización Urbana: Retos Y Aportes Para La Sustentabilidad De La Ciudad De Toluca," *Quivera*, vol. 12, no. 1, pp. 96–102, 2010.
- [11] "Los microclimas urbanos inspiran cambios | URBAN HUB." https://www.urban-hub.com/es/energy_efficiency/replanteando-el-uso-de-los-microclimas-urbanos/ (accessed Feb. 10, 2020).
- [12] F. Huanqui and G. María, "LA ISLA DE CALOR Y LA INCIDENCIA DE LA ARBORIZACIÓN Tesis presentada por la Magister: Arequipa-Perú 2018."
- [13] U. R. Palma, "Pavimentación En El Confort Térmico Urbano En La Avenida Leopoldo Machado ," 2019.
- [14] G. Castro, "Arborización Urbana y su influencia en la Peatonalidad en la ciudad de Tarapoto," 2019.
- [15] A. Perdomo Castro and W. I. Díaz Rodríguez, "Diagnostico piloto y plan de manejo de arborización en la ciudad de Neiva," 2016.
- [16] "Plan de Arborización de la Ciudad de Panamá – Gestion Ambiental." <https://ambiente.mupa.gob.pa/proyectos/> (accessed Feb. 06, 2020).
- [17] L. F. M. Prieto, "Árboles Para El Fortalecimiento De La Estructura Ecológica Principal De Bucaramanga Y Cúcuta," *Revista M*, vol. 3, no. 1, pp. 44–53, 2006.
- [18] menciona que grosser et alii (1989) divide la condición física en: Física., 1.1. condición según j ignacio manzano moreno, en "clarificación de conceptos relacionados con el entrenamiento deportivo", al abordar los "conceptos sobre la condición física" et al., "Universidad De Guayaquil," p. 2018, 2018.
- [19] "Clima promedio en Panamá, durante todo el año - Weather Spark." <https://es.weatherspark.com/y/19385/Clima-promedio-en-Panam%C3%A1-durante-todo-el-a%C3%B1o> (accessed Feb. 07, 2020).
- [20] G. F. Silva, H. Medeiros Licá, J. V. Rego Muniz, and G. Cruz, "INFLUENCE OF URBAN ARBORIZATION ON HUMAN THERMAL COMFORT: CASE STUDY FOR A UNIVERSITY CAMPUS," Aug. 2022. doi: 10.26678/abcm.conem2022.con22-0381.
- [21] Greencitysolutions, "City tree," 2018, [Online]. Available: <https://greencitysolutions.de/en/>
- [22] D. Scarlet, "Tesis Jahazel," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [23] A. Aboelata and S. Sodoudi, "Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo," *Build Environ*, vol. 166, no. August, p. 106407, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106407.
- [24] Y. Liu and D. J. Harris, "Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland," *Appl Energy*, vol. 85, no. 2–3, pp. 115–127, 2008, doi: 10.1016/j.apenergy.2007.06.008.
- [25] R. Buccolieri, J. L. Santiago, E. Rivas, and B. Sanchez, "Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects," *Urban For Urban Green*, vol. 31, no. July 2017, pp. 212–220, 2018, doi: 10.1016/j.ufug.2018.03.003.
- [26] V. Agudelo, W. Becerra, E. Bohórquez, and J. Garzon, "Impacto_arborizacion_urbana".

- [27] B. Moufida and A. Djamel, "Impact of vegetation on thermal conditions outside , Thermal modeling of urban microclimate , Case study : the street of the republic , Biskra .," vol. 18, pp. 73–84, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.019.
- [28] Á. Laguna, "Reglamento de edificación sostenible," *Gaceta Oficial*, Jul. 2019.
- [29] L. Rui, R. Buccolieri, Z. Gao, W. Ding, and J. Shen, "The impact of green space layouts on microclimate and air quality in residential districts of Nanjing, China," *Forests*, vol. 9, no. 4, pp. 1–20, 2018, doi: 10.3390/f9040224.
- [30] D. A. Ortega, U. Jiménez, D. Mora, and M. C. Austin, "Influence of Arborization in Building Energy Consumption and Thermal Comfort: A Numerical Study in Tropical Climate," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2021, vol. 2021-July. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.396.