



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MODELO MATEMÁTICO DE MITIGACIÓN DE TEMPERATURA DE AIRE POR  
IMPLEMENTACIÓN DE VEGETACIÓN ARBÓREA EN LA CIUDAD DE  
CHIHUAHUA, CHIH. MÉXICO.**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL  
Presenta:  
M. Arq. Jesús Abelardo Licón Portillo**

**ASESOR:  
Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza**

**CHIHUAHUA, CHIHUAHUA, JUNIO 2024.**



## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de esta tesis. En primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para superar cada desafío. A mi madre, María Magdalena, por su amor incondicional. A mi padre, Edgardo, por inculcarme el valor de la perseverancia y la dedicación. A mi hermana mayor, Nena, y a mi hermano mayor, Edgar, por ser mis ejemplos. A mi hermana menor, Pamela, por ser mi motivo para ser un buen ejemplo a seguir y así buscar superarme cada día.

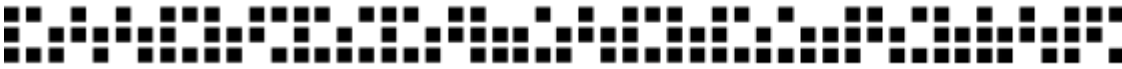
Un agradecimiento muy especial a mi amiga Karen Estrella, cuyo apoyo y amistad han sido pilares fundamentales durante este proceso. Su compañía, apoyo y comprensión fueron invaluable. Agradezco profundamente al Dr. Eduardo Herrera, por su guía, paciencia, valiosos consejos, risas y tiempo que han sido esenciales, para que mi tiempo en el CIMAV haya sido de agradable y de gran provecho.

Quisiera también recordar con cariño a mi mascota Chiki, cuya compañía fue una fuente de consuelo y alegría. Aunque ya no esté físicamente, su recuerdo sigue siendo un aliento en mi vida. Finalmente, no puedo olvidarme de agradecerme a mí mismo, por la determinación y el esfuerzo que he puesto en cada etapa de este trabajo. Esta tesis es el resultado del esfuerzo y amor de todos ustedes, a quienes les dedico todo lo que soy y he logrado.



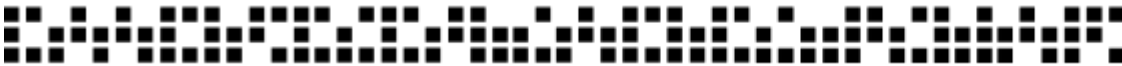
## RECONOCIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros reconocimientos a todas las personas que han contribuido significativamente a la realización de esta tesis, entre ellos se encuentran a mis síndicos que me han acompañado y aconsejado desde el primer semestre de este camino de 4 años, a la Julia Navarro, Erasmo Orrantia, Guillermo Gonzales, Ricardo Beltrán, Víctor Reyes y a mi asesor Eduardo Florencio Herrera Peraza, a todos ellos por su asesoría y dedicación. Su orientación y buenos consejos han sido fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. A todos ustedes, les extiendo mi mas profundo reconocimiento y gratitud.



## TABLA DE CONTENIDO

Lista de figuras.....	V
Lista de tablas .....	VII
Resumen.....	VIII
Abstract.....	IX
Introducción .....	1
Capítulo 1: Planteamiento del problema .....	3
1.1. Justificación.....	4
1.2. Antecedentes .....	5
1.3. Pregunta e hipótesis.....	9
1.4. Objetivos de investigación .....	9
Capítulo 2: Marco teórico .....	10
2.1. Estrategias bioclimáticas .....	10
2.1.1. Uso de la vegetación.....	11
2.1.2. Características de la vegetación que propician la mitigación de la temperatura .....	15
2.2 Simulación .....	21
2.2.1. ENVI-met .....	21
2.3. Estadística .....	23
2.3.1. Tipos de estadística .....	24
2.3.2. Diseño experimental.....	25
2.3.3. Correlación y regresión .....	25
2.3.4. Componentes principales y análisis factorial .....	26
2.3.5. Modelo matemático.....	27
Capítulo 3: Método .....	28
3.1. Delimitación.....	29
3.1.4. Selección de simulador.....	30
3.1.5. Periodo de estudio .....	31
3.2. Experimentación .....	33
3.2.1. Área de estudio.....	33



3.2.2. Instrumentos .....	34
3.2.3. Recolección de datos .....	38
3.2.4. Envi-Met.....	40
3.2.6. Conformación de la base de datos .....	43
3.3. Modelación.....	44
3.3.1. Preparación de datos.....	44
3.3.3. Exploración de datos .....	46
3.3.3. Análisis estadístico.....	46
3.3.2. Modelado predictivo.....	47
Capítulo 4: Resultados .....	48
4.1 Experimentación .....	48
4.2 Modelado matemático.....	50
4.2.1. Estadística descriptiva .....	50
4.2.2. Análisis factorial .....	51
4.2.3. Componentes principales .....	55
4.2.2. Regresión lineal múltiple.....	56
Capítulo 5: Discusión.....	65
Capítulo 6: Conclusión .....	68
Referencias.....	69
Anexo .....	82
Anexo A. Tabla de vegetación con características para el Municipio de Chihuahua .....	82
Apéndices.....	83
Apéndice A. Análisis para identificar día representativo.....	83
Apéndice B. Análisis de índice de área foliar de vegetación arbórea en Ciudad Chihuahua, Chih. México.....	84
Apéndice C. Análisis de índice de área foliar de vegetación arbórea en Ciudad Chihuahua, Chih. México.....	92



## Lista de figuras

Figura 1. Número de publicaciones que analizan algún parámetro de la vegetación .....	15
Figura 2. Parámetros de la vegetación .....	20
Figura 3. Flujo de datos generales en ENVI-met, elaborado a partir de Bruse, (2018). .....	22
Figura 4. Diagrama de marco metodológico.....	29
Figura 5. Porcentaje del uso de programas informáticos en publicaciones internacionales. ...	31
Figura 6. Representación simple del área de estudio; izquierda vista en planta; derecha vista en alzado. ....	34
Figura 7. Pasos para seguir en el uso de la aplicación Goble Observer, Trees. ....	35
Figura 8. Proceso para la obtención de archivo climáticos en Meteonorm 7.....	35
Figura 9. Pasos para seguir en el uso del programa Hemisfer 3 .....	36
Figura 10. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, cámara Canon 80D, lente EF-S 18-135mm IS .....	37
Figura 11. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM.....	38
Figura 12. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM.....	39
Figura 13. Ejemplo de modelo arbóreo (escenario 1, 10 y 19). ....	41
Figura 14. área de escenario de experimentación con localización de receptores .....	42
Figura 15. Área de escenario de experimentación con localización de elemento arbóreo.....	42
Figura 16. Histograma de Mitigación de temperatura (M) .....	50
Figura 17. Grafica de valores individuales de M .....	51
Figura 18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados .....	55
Figura 19. Grafica de efectos principales para M (medias ajustadas).....	55
Figura 20. Grafica de interacción para M (Medias ajustadas) .....	56
Figura 21. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 4-variables .....	58
Figura 22. Graficas de probabilidad normal y residuos vs ajustes de modelo 4-variables .....	59

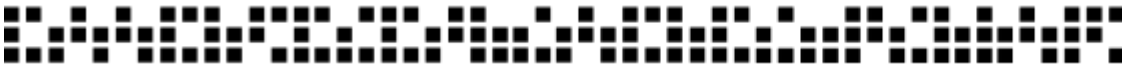


Figura 23. Histograma y grafica de residuos vs orden de modelo 4-variables .....59

Figura 24. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 3-variables .....60

Figura 25. Graficas de residuos para M modelo 3-variables .....61

Figura 26. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 2-variables .....63

Figura 27. Graficas de residuos para M de modelo 2-variables.....63



## Lista de tablas

Tabla 1. Recopilación de métodos para estimar el IDF .....	17
Tabla 2. Descripción de los programas de ENVI-met. ....	22
Tabla 3. Resultados de validación experimental en otros estudios .....	23
Tabla 4. Proceso.....	24
Tabla 5. Diferencias entre correlación y regresión. ....	26
Tabla 6. Variables .....	30
Tabla 7. Datos de temperaturas medias mensuales obtenidas del archivo climático EPW a través del Climate consultant 6.0.....	32
Tabla 8. Caracterización de temperatura mensual de la ciudad de Chihuahua, Chih, México	32
Tabla 9. Especificaciones de lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM .....	38
Tabla 10. Método para la obtención del IAF en el programa informático Hemisfer .....	39
Tabla 11. Fragmento de tabla de determinación de IAF.....	40
Tabla 12. Valores de las variables de la vegetación a utilizar para la simulación de escenarios.	40
Tabla 13. Resumen de diseño factorial (niveles 3,3,3,3) .....	41
Tabla 14. Condiciones límite para simulación.....	43
Tabla 15. Primer criterio de selección de datos .....	44
Tabla 16. Segundo criterio de selección de datos .....	45
Tabla 17. Tercer criterio de selección de datos.....	45
Tabla 18. Fragmento de base de datos .....	46
Tabla 19. Valores mínimos, promedio y máximos de IAF por diferentes modelos de calculo	48
Tabla 20. Base de datos de mitigación de temperatura de aire .....	49
Tabla 21. Análisis descriptivo.....	50
Tabla 22. Análisis factorial, eliminación de términos hacia atrás.....	52
Tabla 23. Factores, niveles y valores .....	54
Tabla 24. Análisis de varianza .....	54





## Resumen

La isla de calor urbana (ICU) es un fenómeno que afecta la sostenibilidad de las ciudades y el Gobierno del Estado de Chihuahua ha reconocido que es una de las problemáticas que deben enfrentarse para mejorar la calidad de vida de todos los chihuahuenses. Principalmente se ha detectado que en la temporada cálida este fenómeno afecta el confort térmico humano, lo que puede influir en la morbilidad, el gasto energético, la productividad y la calidad de vida en general. Se desarrolló un modelo matemático simple basado en experimentación para aprovechar y dar sustento teórico al uso de la vegetación arbórea como herramienta para la mitigación de la ICU en la ciudad de Chihuahua, Chih. México, enfocado en las características físicas principales de la vegetación y su relación con la mitigación de la temperatura del aire. Las características físicas de altura, altura de tronco, diámetro e índice de área foliar de la vegetación de la ciudad de Chihuahua fueron determinadas a través de la revisión de literatura y por medio del monitoreo en sitio realizado en varios parques representativos de la ciudad. Se generaron 81 escenarios de experimentación a través del programa informático de simulación micro climática en ENVI-met, en los cuales se realizaron variaciones de las características físicas de la vegetación para poder identificar su relación con el efecto de mitigación de temperatura de aire. Los resultados sugieren que las características físicas del arbolado de “altura total” y “altura del tronco” tiene una relación débil con la mitigación de temperatura ( $r < 0.2$ ), el “índice de área foliar” muestra una relación moderada ( $0.4 < r < 0.6$ ) y el “diámetro de dosel” muestra una relación alta ( $0.6 < r < 0.8$ ). Como resultado final, se desarrolló un modelo matemático para que planificadores y profesionales de las ciencias urbanas, puedan aplicarlo para determinar, a partir de sus características física, el potencial de mitigación de temperatura de aire de la vegetación en la ciudad de Chihuahua, de tal manera que el diseño de áreas verdes y espacios públicos contribuyan a mejorar la calidad del ambiente térmico de manera más eficiente.



## Abstract

The urban heat island (UHI) is a phenomenon that affects the sustainability of cities, and the Government of the State of Chihuahua has recognized that it is one of the problems that must be faced to improve the quality of life of all citizens. Mainly, it has been detected that in the warm season, this phenomenon affects human thermal comfort, which can influence morbidity, energy expenditure, productivity, and quality of life in general. A simple mathematical model based on experimentation was developed to take advantage of and provide theoretical support for using tree vegetation to mitigate UHI in the city of Chihuahua, Chih. Mexico, focused on the main physical characteristics of vegetation and its relationship with air temperature mitigation. The physical characteristics of height, trunk height, diameter, and leaf area index of the vegetation of the city of Chihuahua were determined through a literature review and on-site monitoring carried out in several representative parks of the city. Eighty-one experimental scenarios were generated through the microclimatic simulation computer program ENVI-met, in which variations of the physical characteristics of the vegetation were made in order to identify their relationship with the air temperature mitigation effect. The results suggest that the physical characteristics of the tree's "total height" and "trunk height" have a weak relationship with temperature mitigation ( $r < 0.2$ ), the "leaf area index" shows a moderate relationship ( $0.4 < r < 0.6$ ) and "canopy diameter" shows a high relationship ( $0.6 < r < 0.8$ ). As a final result, a mathematical model was developed so that planners and urban science professionals can apply it to determine, based on its physical characteristics, the air temperature mitigation potential of the vegetation in the city of Chihuahua in such a way that the design of green areas and public spaces contributes to improving the quality of the thermal environment more efficiently.



## Introducción

Actualmente, las ciudades enfrentan retos climáticos debido a los procesos de expansión y densificación urbana, una de las problemáticas a resolver es la Isla de Calor Urbana (ICU) (Bowler et al., 2010) este fenómeno fue descrito por primera vez por Howard en 1833 (Gartland, 2012) cuando identificó un exceso de calor artificial en el clima de Londres (Howard, 1833), actualmente se considera a la ICU como la diferencia de temperatura entre áreas urbanas y sus alrededores rurales (Gartland, 2012; Villanueva-Solis et al., 2013).

Villanueva-Solis et al., (2013) comentan que la ICU se relaciona con la calidad de aire, la gestión de la energía, la salud pública y la planeación urbana, además Giguere, (2009) coincide en que el fenómeno deteriora la calidad de aire de los espacios interiores, aumenta la demanda de agua potable y afecta el confort humano.

La ICU se asocia al proceso de urbanización, que ocasiona una alta pérdida de cubierta vegetal, lo que disminuye el efecto de mitigación de la evapotranspiración y sombreado en la temperatura de aire; además las actividades antropogénicas como, la industria, el transporte, entre otros, tienen emisiones térmicas que contribuyen al calentamiento urbano (Akbari et al., 1987; Völker et al., 2013); por lo tanto, gran parte de la población habita en ambientes urbanos con temperaturas altas y mala calidad de aire, lo que impacta negativamente en la calidad de vida de los habitantes (Alberti & Marzluff, 2004; Gregg et al., 2003; Grimm et al., 2008; Newman & Jennings, 2008).

Los efectos de las altas temperaturas pueden ocasionar desmayos, insolación, sarpullido, agotamiento, calambres y hasta la muerte (Emmanuel & Fernando, 2007), además la exposición continua al calor puede generar enfermedades crónicas, como el desarrollo de cálculos renales y baja resistencia al calor (Keim et al., 2002); Kolokotroni et al., (2012) mencionan que las altas temperaturas impactan en el uso de energía, que aumenta debido al uso continuo del aire acondicionado. Por lo anterior, es necesario mitigar los efectos de la ICU.

Para mitigar el sobrecalentamiento en las ciudades, se han implementado diversas estrategias como el uso de vegetación, uso de superficies de alto albedo, uso de superficies permeables, diseño adecuado de la morfología de la ciudad y reducción de las actividades como el uso del automóvil, entre otros (Makido et al., 2019; Oke et al., 1989; Taslim et al., 2015). Los investigadores concuerdan en que la estrategia de uso de vegetación tiene un papel importante en la mitigación de la temperatura en las ciudades (Bartésaghi Koc et al., 2018; Vaz Monteiro et al., 2019); de acuerdo con Huang et al., (1992) la vegetación es una de las estrategias efectivas para mitigar la temperatura y ahorro de energía en las ciudades a través de los efectos en el clima.

Para el estudio de los efectos en el microclima de la vegetación, se ha observado el uso de datos monitoreados en sitio y modelos estadísticos y simulación (Bartesaghi Koc et al., 2018; Motazedian & Leardini, 2012); este último método, de acuerdo con Ali-Toudert & Mayer, (2007) es una aproximación fácil, rápida y económica comparada al método de observación o monitoreo para realizar lineamientos de diseño ya que se puede experimentar con las variables y determinar su relación.

Considerando lo anterior, se han realizado una gran cantidad de estudios con respecto a la vegetación y los efectos en el medio ambiente urbano, en los que destacan los beneficios en el microclima, además en la literatura se ha identificado la importancia de generar lineamientos de diseño que incorporen el uso de la vegetación como mitigador de la temperatura, y que aún hace falta conocimiento con respecto a la cantidad, tipo y distribución de la vegetación y su relación con la temperatura superficial y del aire. Por lo que la presente investigación pretende definir un modelo simplificado para predecir la mitigación de temperatura mediante el uso de vegetación y su área de efecto de enfriamiento.

El documento se estructura en 5 capítulos que contienen el planteamiento del problema, marco teórico, metodología, discusión y resultados y conclusiones. En el planteamiento del problema se describe de manera estructurada y a detalle la idea de investigación, se contextualiza el problema, se expone la pertinencia, el para qué y el porqué del estudio (justificación), se revisa los estudios ya realizados sobre el tema (antecedentes), se expone la pregunta de investigación y su probable respuesta que dará forma al presente estudio (pregunta e hipótesis) y finalmente se enlistan los objetivos a lograr que serán guía para poder comprobar la hipótesis y dar respuesta a la pregunta de investigación. En el marco teórico se presenta todo el apoyo teórico necesario para situar la propuesta de investigación dentro del campo de estudio en el cual se desarrolla, definiendo conceptos básicos y complementando con los hallazgos más recientes sobre el tema. La metodología analiza el proceso por el cual se desarrolló la investigación, el lugar, el tiempo, muestras, diseño, procedimientos, métodos de recolección de datos, entre otros; la cual establece la estructura para documentar y llevar a cabo la experimentación, recolección y análisis de datos.

El apartado de resultados se limita a presentar los datos obtenidos de la investigación, por medio de tablas, gráficas y su descripción, de tal manera que el lector pueda comprender la intención de los datos. La discusión se enfoca en el análisis de los resultados, sus implicaciones y limitaciones; se desarrolla como los resultados responde a nuestra pregunta de investigación y su relación con los antecedentes; además de recomendaciones que se desprendan del mismo análisis.



## Capítulo 1: Planteamiento del problema

En las ciudades se ha identificado un aumento de temperaturas debido a la Isla Urbana de Calor (ICU) que se refiere al fenómeno donde la temperatura en áreas urbanas es más alta que en áreas rurales (Kolokotroni & Giridharan, 2008; Taleghani, 2018; Voogt & Oke, 2003). La principal causa asociada a la ICU es la modificación del balance energético en las zonas urbanas, que se debe a varios factores, como la modificación de áreas verdes naturales a superficies impermeables como consecuencia del rápido desarrollo urbano, además de ser consecuencias del cambio climático global (Balany et al., 2020).

El Gobierno del Estado de Chihuahua, (2016) en el Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Chihuahua: Visión 2040 reconoce la presencia del fenómeno de la ICU en la ciudad y de acuerdo con las proyecciones del (INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, n.d.), en el estado de Chihuahua existe una probabilidad de aumento de la temperatura máxima a corto plazo (2021-2040) de 1.3 a 1.5°C, mediano plazo (2041-2060) de 1.8 a 2.7°C y largo plazo (2081-2100) de 1.7 a 5.6°C. El aumento de temperatura genera tendencias de degradación de la calidad del ambiente urbano (W. Wang et al., 2019), que aumentan las condiciones de estrés térmico, que se asocian a problemas de salud y muertes de la población vulnerable (Department of Health, 2015; Mora et al., 2017; Moss et al., 2019)

De manera específica, el H. Ayuntamiento de Chihuahua, (2015) menciona en el Plan de Acción Climática Municipal, que las áreas verdes, el agua, la contaminación del aire y el uso de energía eléctrica presentan problemáticas que deben solucionarse. Los datos indican que existe un déficit aproximado de entre 200 y 300 hectáreas de áreas verdes, lo cual aumenta el fenómeno de la ICU (Chen et al., 2009; Li et al., 2012; Smith & Levermore, 2008).

De acuerdo con Kleerekoper et al., (2012) la ICU puede provocar efectos adversos en la salud de las personas, por medio del estrés por calor y causando problemas respiratorios al aumentar el ozono troposférico; Colombert, (2008) señala que la ICU puede aumentar la presencia de olas de calor, reducción de la eficiencia de los modos pasivos de enfriamiento de edificios, aumento del gasto energético de los espacios interiores y la disminución de la calidad climática de los espacios públicos.

Por lo anterior, se considera que el problema de la ICU en la ciudad de Chihuahua, Chih. México debe ser estudiado para generar estrategias y lineamientos que permitan mitigar el aumento de temperatura, de tal manera que se promueva un ambiente térmico interior y exterior más saludable y alineado a los ejes del desarrollo sustentable.



## *1.1. Justificación*

Los problemas asociados al sobrecalentamiento urbano pueden ser mitigados mediante el uso de la vegetación en zonas urbanas, a fin de generar condiciones de confort térmico, mejorar la calidad de aire y disminuir indirectamente el uso de energía. Estudios en los que se analizó la aplicación de vegetación en zonas urbanas, concuerdan y han demostrado que la presencia de áreas verdes contribuye a la mitigación de la temperatura de aire en las ciudades (Bowler et al., 2010; Givoni, 1998; Lai et al., 2019; Motazedian & Leardini, 2012; Nuruzzaman, 2015; V. Olgyay, 1963; Whiston Spirm & Naudé Santos, 1981; Zupancic et al., 2015a).

La vegetación cumple con funciones urbanas, como la regulación de condiciones climáticas, reduce la contaminación del aire (Givoni, 1998; V. Olgyay, 1963), genera ahorros energéticos (J. Huang, Ritschar, et al., 1992), mejora la salud pública, genera oportunidades de trabajo, y en consecuencia aumenta la calidad de vida (Molla, 2015). Lo anterior, se asocia a los compromisos planteados en la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, específicamente los objetivos de “Salud y Bienestar”, “Ciudades y comunidades sostenibles”, “Acciones por el clima” y “vida de ecosistemas terrestres”. Además, en México se han definido Programas Nacionales Estratégicos para dar solución de forma integral a problemáticas en el país, uno de los temas prioritarios es la energía y el cambio climático, en el que se busca mitigar los efectos del cambio climático, lo que se puede lograr a través del aumento de la cobertura vegetal en las ciudades.

En la literatura, se observa gran cantidad de estudios con respecto a la vegetación y los efectos en el medio ambiente urbano, evidencia de esto son la revisión del estado del arte realizados por Bartesaghi Koc et al., (2018); Bowler et al., (2010); Molla, (2015); Morgan & Gilbert, (2002); Motazedian & Leardini, (2012); Zupancic et al., (2015). Los autores coinciden en que la finalidad de evaluar la vegetación, debería ser la definición de lineamientos que se incorporen en el proceso de diseño; pero actualmente, pocos estudios han desarrollado estos lineamientos (Motazedian & Leardini, 2012), por lo que se recomienda la elaboración de directrices para mitigar los efectos de la isla urbana de calor (Bartesaghi Koc et al., 2018).

El presente estudio comprende el desarrollo de un modelo matemático predictivo para la mitigación de temperatura de aire ocasionado por el uso de vegetación arbórea urbana en la ciudad de Chihuahua, Chih. México, lo cual permitirá mejorar el diseño e implementación de las áreas verdes como estrategia de enfriamiento pasivo. El modelo será de utilidad para los arquitectos, diseñadores, urbanistas, paisajistas y toda aquella disciplina relacionada con el ambiente térmico urbano, ya que permitirá identificar las características físicas de la vegetación que contribuyen a mejorar el microclima urbano.



## *1.2. Antecedentes*

Los antecedentes de la investigación se identificaron a partir de la revisión sistemática de 262 artículos publicados de 1990 a 2023, resultado de una búsqueda en Google Académico y la base de datos de SCOPUS a partir del uso de las siguientes palabras: “vegetación urbana”, “enfriamiento”, “vegetación”, “parque urbano” y “árbol”. En este apartado, se mostrará entre paréntesis "(#)" el número de artículos que se identificaron en la revisión de literatura.

A nivel internacional se identificó que la investigación sobre vegetación se ha desarrollado en el continente asiático (123) y europeo (74), en países desarrollados como China, Grecia, Japón, Italia y Alemania, además se observó que en el continente americano (83) los estudios se concentran en diferentes ciudades de Estados Unidos. Lo anterior, deja en evidencia, que en países en vías de desarrollo como México, aún falta generar investigación sobre el uso de la vegetación y su impacto en el enfriamiento, uno de los investigadores que ha desarrollado el tema es [Barradas, \(1991\)](#) con la evaluación de índices de confort en parques urbanos de la Ciudad de México y [Colunga et al., \(2015\)](#) con el estudio de la vegetación y la isla de calor en la ciudad de Querétaro.

De acuerdo con la literatura, los sitios estudiados se caracterizan por condiciones climáticas del sistema de clasificación de Köppen-Geiger de tipo subtropical-húmedo (Cfa) (68), marítimo de costa occidental (Cfb) (49) y mediterráneo (Csa) (39). Además, se observó que son pocos los estudios desarrollados en clima desértico cálido (BWh) (19), clima árido templado y frío (BWk) (10) y clima semiárido cálido (BSh) (6). Investigadores como [Abdel-Aziz et al., \(2015\)](#); [Halper et al., \(2012\)](#) y [Holmer et al., \(2013\)](#), han realizado estudios en sitios semiáridos, específicamente [Jonsson, \(2004\)](#), realizó un estudio en Gaborane, África e identificó que las áreas con mayor densidad de vegetación son al menos 2°C más frescas que aquellas zonas con vegetación dispersa. [Colunga et al., \(2015\)](#), realizaron un estudio en la ciudad de Querétaro, México e identificaron un enfriamiento de 2.18°C en la temporada cálida.

El estudio de la vegetación se ha desarrollado a nivel microescala (206), los investigadores han avanzado en el conocimiento de la vegetación urbana, a través de estudios de elementos vegetales agrupados (232), y en menor grado por medio del análisis de la vegetación aislada (22). Con respecto a los tipos de vegetación, los estudios se han enfocado en escenarios con vegetación mixta (139) y arbórea (109). En cuanto a los parámetros de vegetación, se identificó una tendencia alta de abordar los estudios a través de parámetros espaciales (199) y parámetros físicos (145). Respecto a los parámetros físicos los que se estudian más son: altura del árbol (68), índice de área foliar (59) y diámetro de dosel (39).



Los estudios se han realizado monitoreando parámetros climáticos, principalmente la temperatura de aire (220), humedad relativa (170), velocidad de viento (159), temperatura superficial (113), radiación solar (94), dirección de viento (83), temperatura media radiante (51), entre otros. Como variable dependiente, la temperatura de aire (113), ha resultado ser la de mayor importancia en los estudios de vegetación urbana, seguida por temperatura superficial (54), índices de confort (48) y energía (20).

En cuanto al diseño metodológico, se identificó que los estudios son de tipo descriptivo (169) que se caracterizan por obtener datos en sitio y con ellos explicar un fenómeno sin realizar alguna intervención, mientras que una menor cantidad son estudios experimentales (93) que se enfocan en modificar variables de un fenómeno para identificar sus relaciones. A continuación, se describen algunos de los estudios experimentales; [Park et al., \(2012\)](#) desarrollaron un experimento en Saitama, Japón, mediante un modelo a escala de un cañón urbano, el cual consistió en analizar en la temporada de verano, los efectos de la vegetación en el ambiente térmico en banquetas y calles, mediante ocho modelos a escala en los que se evaluaron diversas condiciones de vegetación, y determinaron que la presencia de árboles en la banqueta redujo la velocidad de viento en un 51%. Otro caso experimental fue presentado por [Ow et al., \(2019\)](#) en Singapur, en el que analizaron las características foliares y condiciones de suelo durante el crecimiento del árbol *Samanea saman* y su relación con el potencial de enfriamiento, el experimento se llevó a cabo durante 3 años con árboles en diferentes condiciones urbanas, y se identificó mayor potencial de enfriamiento en árboles localizados en suelo estructural, y un 76% a 81% de enfriamiento menor en árboles rodeados de pavimento. Además, [Zhao et al., \(2018\)](#) identificaron en la ciudad de Tempe, Arizona, el efecto de enfriamiento de la cubierta de los árboles, a través de un modelo a escala de la zona urbana, evaluaron 10 escenarios en los que modificaron la densidad de los árboles, la ubicación y la distribución; los resultados muestran la importancia de la ubicación y distribución de la vegetación con respecto al ambiente construido.

Los métodos para estimar la mitigación de temperatura identificados en la revisión de literatura fueron principalmente estadísticos (234) en los que se observan datos para identificar patrones o tendencias; seguidos por simulación (84) que son estudios que generan modelos para llevar a cabo experimentos de manera digital; y finalmente estudios de modelado (55) que refieren a investigaciones que, con un conjunto de datos buscan generar modelos, fórmulas o ecuaciones. A continuación se describen algunos de los estudios de modelado; [Ballinas & Barradas, \(2016\)](#) desarrollaron un modelo basado en el balance energético para calcular la mitigación de la temperatura del aire ( $T_a$ ) en la Ciudad de México, el modelo que se muestra en Ecuación 1 se define por el cambio del flujo de calor latente al aumentar la cobertura arbórea para reducir el flujo de calor sensible y la temperatura del aire; este estudio sugiere que para mitigar la ICU se debe realizar la



correcta selección de especies de árboles, ya que para reducir 1°C de  $T_a$  se requiere de 63 árboles grandes de *Eucalyptus camaldulensis* por hectárea, mientras que para reducir la  $T_a$  en 2°C sólo se necesitan 24 árboles grandes de *Liquidambar styraciflua*.

$$T_A = f(Q_N - [Q_E + Q_{ETRP}]) \quad \text{Ec. [1]}$$

- $Q_N$  = Radiación neta
- $Q_E$  = Flujo de calor latente
- $Q_{ETRP}$  = Flujo de calor latente debido a la transpiración del árbol
- $T_A$  = Mitigación de temperatura

Otro de los estudios en los que se desarrolló un modelo fue el de [Zhou et al., \(2019\)](#), en el que analizaron los efectos de enfriamiento de un espacio verde en Nanking, China, mediante el análisis de correlación y modelos de regresión de 78 espacios verdes, identificaron que los espacios verdes grandes y regulares tienen una mayor distancia de enfriamiento, a diferencia de los pequeños e irregulares; en general, mayor área puede mejorar la intensidad de enfriamiento de un espacio verde cuando es menor a 10 ha; y la reducción de la complejidad de la forma de un espacio verde puede mejorar la intensidad del enfriamiento cuando los espacios verdes tienen más de 5 ha. En la Ecuación 2 se muestra el modelo para calcular la distancia de enfriamiento.

$$CD_{max} = b / (e^{T_m/a} - 1) \quad \text{Ec. [2]}$$

- $CD_{max}$  = Distancia máxima de enfriamiento
- $b$  = Ancho de anillo amortiguador (buffer ring)
- $T_m$  = umbral mínimo para definir el efecto de enfriamiento existente
- $a$  = coeficiente del modelo de regresión logarítmica

Recientemente [Bartesaghi-Koc et al., \(2020\)](#) desarrollaron un modelo matemático mediante un estudio en Sídney, Australia, en el que utilizaron un esquema de "tipología de infraestructura verde" (GIT, por sus siglas en inglés), analizaron la interacción y los impactos acumulativos de enfriamiento de los elementos naturales y artificiales en verano e invierno, considerando las propiedades morfológicas y espaciales; los datos fueron analizados mediante correlación, regresión lineal simple e índice de vegetación térmica (TVX, por sus siglas en inglés), los hallazgos indican que las diferentes formas de GIT que se caracterizan por diferente número y composición de las características naturales y artificiales tienen un papel importante en la reducción de la temperatura de la superficie.

En cuanto a los estudios realizados por medio de herramientas digitales, se identificó que el uso de ENVI-met© (69) es el predominante; este programa es un modelo microclimático tridimensional no hidrostático, para calcular y simular el clima en áreas urbanas ([D. Bruse & Bruse, 2017](#); [Ozkeresteci et al., 2003](#); [Rui et al., 2019](#)). A continuación, se describen algunos estudios que utilizaron ENVI-met.



Morakinyo et al., (2020) realizaron el estudio de la combinación de 54 formas genéricas de un árbol y 10 variaciones de la morfología urbana (SVF-Sky View Factor), los valores de mitigación de temperatura durante el día y la noche fueron de 0.3-1.0°C y de 0.0-2.0°C respectivamente, el potencial de reducción de calor se determinó a partir del confort térmico; Wai et al., (2020) estudiaron la efectividad de enfriamiento de la vegetación, por lo que se analizaron dos sitios urbanos de Hong Kong, mediante simulación del microclima en ENVI\_met se estimó que el flujo de calor sensible y la temperatura de la superficie eran de al menos  $40 \text{ Wm}^{-2}$  y 5 °C más altos que los casos con mayor presencia de ozono. Para la situación de bajo SVF con un menor valor de índice de área foliar en un 25%, los valores de temperatura equivalente fisiológica (PET) indicaron que el estrés fisiológico relacionado con el calor aumentó en 1 grado en las zonas con vegetación; Ouyang et al., (2020) analizaron la correlación entre la proporción de cobertura vegetal y los beneficios de enfriamiento de la vegetación; a través de escenarios con diversas combinaciones de densidades urbanas (baja, media y alta) y proporciones de cobertura de árboles (2 % a 30 % en intervalos de 2 % y 56 % para cobertura de área completa que no sean edificios), se llevaron a cabo experimentos paramétricos en un modelo de ENVI validado.

Finalmente, datos de 59 estudios reportan que la mitigación de temperatura, ocasionada por la vegetación urbana, se encuentra en un rango medio de 0.9 a 2.8 °C, lo cual coincide con Oke, (1989) quien identificó una mitigación de 1 a 3°C, pero difiere de Bowler et al., (2010) quienes observaron una mitigación de 0.71 a 1.16°C basados en 16 estudios, en el caso del estudio de Lai et al., (2019) la mitigación fue de 0.6 a 6.9 °C basado en 21 estudios, Zupancic et al., (2015b) identificó un rango de 4 a 7 °C basado en 11 estudios y Shashua-Bar & Hoffman, (2000) observó una mitigación de 1 a 7 °C.

En síntesis, con respecto a la mitigación de temperatura de aire por uso de vegetación en México existe poca investigación publicada, en el caso del clima Bsh semiárido cálido correspondiente a la ciudad de Chihuahua, la literatura que lo aborda es limitada; la vegetación es estudiada principalmente en grupos, por lo que no se ha definido con precisión la aportación individual de los elementos que lo conforman; la mayoría de los estudios se desarrollan desde una perspectiva descriptiva, lo que dificulta la determinación de causa-efecto; en cuanto a las variables de la vegetación, en los estudios sobre el tema se analizan principalmente variables espaciales, que aportan conocimiento para una mejor distribución de la vegetación, por lo que falta desarrollar investigación que permitan generar datos para una mejor selección de elementos vegetales; además el programa informático de mayor uso es ENVI-met, considerando esta información, la comunidad de investigadores concuerdan en que la vegetación es una estrategia útil para mitigar la temperatura de aire en las ciudades y que se pueden alcanzar rangos de mitigación de entre los 0.6 a 6.9°C.



### ***1.3.Pregunta e hipótesis***

#### Pregunta

- ¿Cuáles son las características físicas que permiten estimar la mitigación de temperatura de aire máxima de la vegetación arbórea en el ambiente térmico de la ciudad de Chihuahua, Chih? México?

#### Hipótesis

- Las características físicas que permiten estimar la mitigación de temperatura de la vegetación en el ambiente térmico estarán en función del índice de área foliar(iaf), altura total (at), diámetro de dosel (dd) y altura de dosel (ad)

### ***1.4.Objetivos de investigación***

#### Objetivo general

- Desarrollar un modelo matemático por medio del análisis estadístico, para estimar la mitigación de temperatura máxima ocasionada por la vegetación arbórea

#### Objetivos específicos

- Identificar las variables relevantes para mitigación de temperatura por medio de la revisión de literatura, para aplicarlas como variables independientes.
- Validar la herramienta de simulación a través de la comparación de resultados entre la realidad y lo simulado para identificar su grado de error.
- Estimar la mitigación de temperatura causada por la vegetación arbórea en las condiciones ambientales de la ciudad de Chihuahua, Chih. a través de la simulación de casos hipotéticos para conformar una base de datos.
- Analizar la base de datos de mitigación de temperatura a través del uso de programación informática para identificar las relaciones entre las variables.

## Capítulo 2: Marco teórico

### 2.1. Estrategias bioclimáticas

El confort térmico es un concepto relacionado con la percepción del ambiente térmico del usuario que lo habita, la norma ISO 7730 y la ANSI-ASHRAE 55 lo definen como la “condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico”. En el espacio público, el confort térmico es relevante, y se define como “unas condiciones óptimas que se conjugan y determinan sensaciones de confort en lo biológico y psicosocial dentro del espacio donde el hombre habita y actúa,... y a la percepción del espacio habitable, como sano, seguro y grato visualmente” (Pérez Maldonado, 1999, p. 40). La calidad de vida urbana está relacionada a la habitabilidad urbana, que impacta en el bienestar de los habitantes desde diferentes temáticas, como la social, la ambiental, la económica, y entre otras (Moreno, 2008).

Para mejorar la habitabilidad en la Arquitectura se han implementado lo que se conoce como estrategias de diseño bioclimáticas. Una herramienta que permite identificar la aplicación de las estrategias de acuerdo a las condiciones del clima, es el denominado diagrama de Givoni (Givoni, 1992). El diagrama se desarrolla a partir de la carta psicrométrica, en el que se definen 5 zonas que corresponden a las estrategias bioclimáticas: confort térmico, ventilación natural, alta masa térmica, ventilación nocturna con alta masa térmica y enfriamiento evaporativo; dentro de esta última estrategia, se considera el uso de la vegetación en sus diferentes escalas (*p. ej.* elementos individuales, agrupados, parques o bosques urbanos).

De acuerdo con Saxena, (2002) el enfriamiento evaporativo se da por el suministro de vapor de agua en el aire, la temperatura de bulbo húmedo se mantiene igual, solo la humedad incrementa y la temperatura de bulbo disminuye; usando la carta psicrométrica, el nivel de enfriamiento puede cuantificarse considerando los valores iniciales de temperatura del aire, su contenido de humedad y la presión barométrica (Hernández Goribar, 2001). Olgyay, (1963) menciona que el uso de la vegetación como estrategia de enfriamiento evaporativo, permite mitigar la temperatura en verano a través del sombreado y la evaporación. Huang et al., (1992) consideran que la vegetación es una de las estrategias más efectivas para mitigar la temperatura y ahorrar energía en las ciudades a través de los efectos en el clima.

Por lo tanto, debido a la eficiencia de la vegetación para mitigar las condiciones térmicas de los espacios públicos y mejorar la habitabilidad de la ciudad, se aborda con mayor profundidad los efectos de la vegetación en el espacio y las características físicas que, de acuerdo con la literatura, tienen relación con el enfriamiento y su impacto en el microclima.

### 2.1.1. *Uso de la vegetación*

En la ciudad, el uso de la vegetación se observa en áreas verdes como parques y vialidades; [Saillard, \(1962\)](#) considera que las áreas verdes se refieren al espacio público o privado, que se componen principalmente de vegetación, en el que se genera condiciones para la práctica de deportes, el juego, y actividades de esparcimiento y reposo, además se consideran espacios seguros. La vegetación es utilizada como una forma de mitigar la temperatura en las ciudades ([Deering, 1953](#)) debido al impacto en el microclima por medio del bloqueo de radiación solar (sombreado), y a la evaporación de agua en el aire (evapotranspiración) que produce un enfriamiento adiabático, entre otros ([Olgyay & Olgyay, 1957](#)); en la actualidad la comunidad científica coincide en que la vegetación tiene beneficios en el microclima de las ciudades.

Al respecto, [Huang et al., \(1992\)](#) comentan que la vegetación es una de las estrategias efectivas para mitigar la temperatura y ahorrar energía en las ciudades a través de sus efectos climáticos, los cuales clasifica como directos e indirectos; los efectos directos son los que se generan por sombreado y el bloqueo o disminución de velocidad de viento y el efecto indirecto es el obtenido por medio de la evapotranspiración, siendo este último el de mayor impacto en la mitigación de temperatura y ahorro energético.

Los árboles y arbustos funcionan como dispositivos de bloqueo de radiación solar ([Correa et al., 2012](#); [Zheng et al., 2020](#)); además la evapotranspiración de los árboles y arbustos contribuyen a la mitigación de temperatura en áreas amplias ([Rana et al., 2020](#); [Tan et al., 2020](#)). Estudios han mostrado que la evapotranspiración de la vegetación puede tener un mayor potencial de mitigación, a diferencia de los bloqueos por radiación solar y vientos fríos ([Huang, Ritschar, et al., 1992](#); [Kuchelmeister, 2000](#)). A continuación, se describe con mayor detalle los conceptos, la teoría, efectos y hallazgos principales sobre el: a) bloqueo de radiación solar o sombreado; b) evapotranspiración de la vegetación.

#### a) Bloqueo de radiación solar o sombreado

El bloqueo de radiación solar conocido como sombreado, se define como “un área oscura, causada por algún elemento que bloquea la luz” ([Cambridge Dictionary, n.d.](#)); en Arquitectura a los elementos que generan sombra de forma intencional se les denomina dispositivos de control solar. En el caso de la vegetación, los árboles, cubre suelos y arbustos son un medio de control solar, ya que el sombreado se debe a que los elementos de la vegetación son opacos y al estar expuestos a la radiación solar, la filtran, por lo que la radiación es absorbida, reflejada y transmitida a través de las hojas ([Robinette, 1972](#)); uno de los primeros estudios sobre el tema fue desarrollado por [Olgyay & Olgyay, \(1957\)](#) quienes abordan la Climatología y Arquitectura para incorporar elementos (artificiales o naturales) de bloqueo solar al diseño.



Erell et al., (2010) y Hernández, (2013) concuerdan en que la vegetación reduce la incidencia de la radiación de onda corta (radiación emitida por el sol) en superficies y evita la emisión de onda larga (radiación de los objetos en la tierra); Hernández, (2013) señala que el color de las hojas de la vegetación normalmente es más oscuro que una superficie impermeabilizada o pavimentada, por lo que las hojas absorben más cantidad de radiación; esto quiere decir que la vegetación absorbe energía de otros elementos irradianes, además, Lin & Lin, (2010) mencionan que entre más oscuro es el color de la hoja, mayor es su contribución a la mitigación de la temperatura superficial, sin embargo entre más claro, mayor es su contribución a la mitigación de la temperatura del aire.

Considerando lo anterior, la sombra de un árbol con la forma y densidad adecuada puede llegar a bloquear un 95% de la radiación solar directa; además la vegetación contribuye al bloqueo de la radiación solar directa en los elementos que conforman la envolvente arquitectónica, y también de sus alrededores, lo que los convierte en una especie de disipadores de calor (Huang, Ritschar, et al., 1992). Lesiuk, (1979) demostró que la sombra proyectada de la vegetación está determinada por la inclinación, la forma, la altura y la distribución de las hojas. Para comprender los efectos del sombreado en el ambiente urbano, este es estudiado a partir de los parámetros de Índice de Área foliar (IAF), Factor de Cielo Visible (FCV) y el Índice de Densidad Foliar (IDF). Los parámetros se describen con mayor detalle en la sección 2.1.2. del presente documento. Algunos hallazgos principales de los efectos del sombreado se describen a continuación:

Morakinyo et al., (2019) realizaron una investigación mediante el programa informático ENVI-met, en el que simularon de 10 escenarios con el clima subtropical cálido húmedo de verano de Hong Kong; los escenarios considerados fueron: caso de referencia con un grado de cubierta verde del 0%, caso base con un grado de cubierta verde del 7% y 8 casos con diferentes tipos de especies con cobertura vegetal del 32%. Identificaron que una de las causas del enfriamiento del aire se debe al efecto de sombreado de la vegetación, lo que fue determinado por las diferencias de la radiación de onda corta directa media de los escenarios; además, encontraron que en el caso base la atenuación de la radiación de onda corta directa fue de 16%, mientras en el caso con 32% de cubierta verde, la atenuación fue de 40-64% dependiendo de la especie utilizada, esta variación se debe principalmente al índice de área foliar, que presentó una alta correlación con la atenuación de la radiación de onda corta directa ( $R^2=0.87$ ).

En otro estudio desarrollado por Kong et al., (2017) analizaron el confort térmico en zonas exteriores para determinar el impacto de la vegetación arbórea en espacios abiertos y espacios de alta densidad, el estudio fue desarrollado mediante simulaciones en el programa informático *Solar and Long Wave Environmental Irradiance Geometry* (SOLWEIG). Se simularon dos tipos de cañón urbano, uno abierto y otro cerrado, cada uno fue evaluado mediante 12 escenarios con diferentes tipos de vegetación arbórea. Como



resultado del análisis se observa que la reducción de radiación de onda corta fue debido al efecto de sombreado de la vegetación y que las características físicas que promueven este efecto son dosel amplios y pequeña altura de tronco, además identifican que el rango de reducción promedio de  $T_{mrt}$  es de 0.1 a 5.1°C debido al sombreado.

#### b) Evapotranspiración

Respecto a la evapotranspiración se puede definir como:

“La combinación de dos fenómenos, el de evaporación y transpiración; la evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido... a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera; la transpiración es el fenómeno por el cual el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas, esta agua es tomada por las plantas, naturalmente, del suelo” (Aparicio Mijares, 1989, p.47).

El fenómeno de la evapotranspiración (ET), al suministrar vapor de agua al entorno puede tener un efecto importante en el microclima, principalmente en la temperatura del aire; Sánchez-Díaz & Aguirreolea, (2008) mencionan que el 95% del agua absorbida por las plantas pasa simplemente a través de ellas y se pierde por transpiración, a lo cual Huang et al., (1992) consideran que un árbol tiene la posibilidad de transpirar hasta 100 galones de agua al día y, por lo tanto tiene una gran capacidad como estrategia de enfriamiento pasivo en climas cálidos secos, mientras que en climas cálidos húmedos no es una estrategia efectiva de enfriamiento; esto se debe a los límites del aire para absorber humedad, en climas secos la humedad en el aire es baja por lo que puede absorber mayor humedad del ambiente, lo cual se traduce en mayor potencial de mitigación de temperatura, mientras que en climas húmedos, este potencial se ve reducido debido a mayor contenido de humedad en el aire.

De acuerdo con Allen et al., (1998) la evapotranspiración no es fácil de medir, y es un proceso costoso y exigente en términos de precisión de medición ya que se requiere de personal capacitado y de instrumentos específicos para obtener datos de los parámetros requeridos, por lo cual se considera inapropiado para el monitoreo de rutina, pero sigue siendo pertinente para la estimación de la ET por métodos indirectos; estos métodos son los basados en balance de energía y micro climatológicos, balance hídrico del suelo y el modelado a través de información climatológica y el uso del método FAO Penman-Monteith (ver Ecuación 3).



$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad \text{Ec. 3}$$

- $R_n$  = Radiación neta
- $G$  = Flujo de calor en el suelo
- $(e_s - e_a)$  = Déficit de presión de vapor de aire
- $\rho_a$  = Densidad media del aire a presión constante
- $c_p$  = Calor específico del aire
- $\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación
- $\gamma$  = Constante psicrométrica
- $r_s$  = Resistencia superficial
- $r_a$  = Resistencia aerodinámica

La evapotranspiración tiene un efecto de enfriamiento en el microclima, se ha utilizado desde la antigüedad y se emplea mediante la exposición del agua al aire, algunas formas son la exposición de un contenedor de agua al aire que es un proceso de enfriamiento lento, y otras de enfriamiento rápidos, como la pulverización de agua en el aire (Genskow et al., 2008); en ambos casos es un proceso “adiabático” por el que se baja la temperatura de bulbo seco (ASHRAE, 2001; Hernández Goribar, 2001).

De acuerdo con Saxena, (2001) el efecto adiabático en la estrategia de enfriamiento evaporativo se da por el suministro de vapor de agua en el aire, la temperatura de bulbo húmedo se mantiene igual, solo la humedad incrementa y la temperatura de bulbo seco disminuye; mediante la carta psicrométrica, este enfriamiento puede cuantificarse. Hernández Goribar, (2001) considera que “la temperatura resultante de este proceso depende de la temperatura inicial del aire, de su contenido inicial de humedad y de la presión barométrica” (p.47). A continuación, se describen dos investigaciones que evaluaron la evapotranspiración y su relación con el enfriamiento:

Ow et al., (2019) desarrollaron una comparación entre árboles con diferentes condiciones de suelo: suelo pavimentado, suelo con césped y suelo estructural; se encontró que la evapotranspiración en suelo estructural era mayor en un 75% comparado con los árboles en suelo pavimentado y 50% en zonas con césped; además la estimación de enfriamiento en suelo pavimentado fue entre un 76 y un 81% menor que en suelo estructural. Por lo que sus resultados nos sugieren que el suelo estructura es beneficioso para aumentar la evapotranspiración, y que esta tiene una relación con el potencial de enfriamiento. Lindén et al., (2016) realizaron un monitoreo durante dos veranos en cinco áreas urbanas con presencia de vegetación arbórea, tomando en cuenta la temperatura, humedad, transpiración del árbol y flujo de savia; de sus resultados determinó que hubo un enfriamiento significativo debido a la transpiración de la vegetación, pero que existe una gran variabilidad en su intensidad debido a la hora del día y las condiciones meteorológicas.



### 2.1.2. Características de la vegetación que propician la mitigación de la temperatura

A partir de la revisión de 83 artículos publicados que analizaron la vegetación a escala de bloque urbano, se identificaron las características de la vegetación y se clasificaron en parámetros físicos, biológicos y espaciales, en la Figura 1 se observa que hay una tendencia en establecer la relación de la mitigación de temperatura con los parámetros físicos (p. ej. altura total, índice de área foliar, diámetro del dosel), también son de interés los parámetros espaciales (p. ej. presencia de vegetación y tamaño del área verde) y por último los biológicos (p. ej. evapotranspiración y flujo de savia).

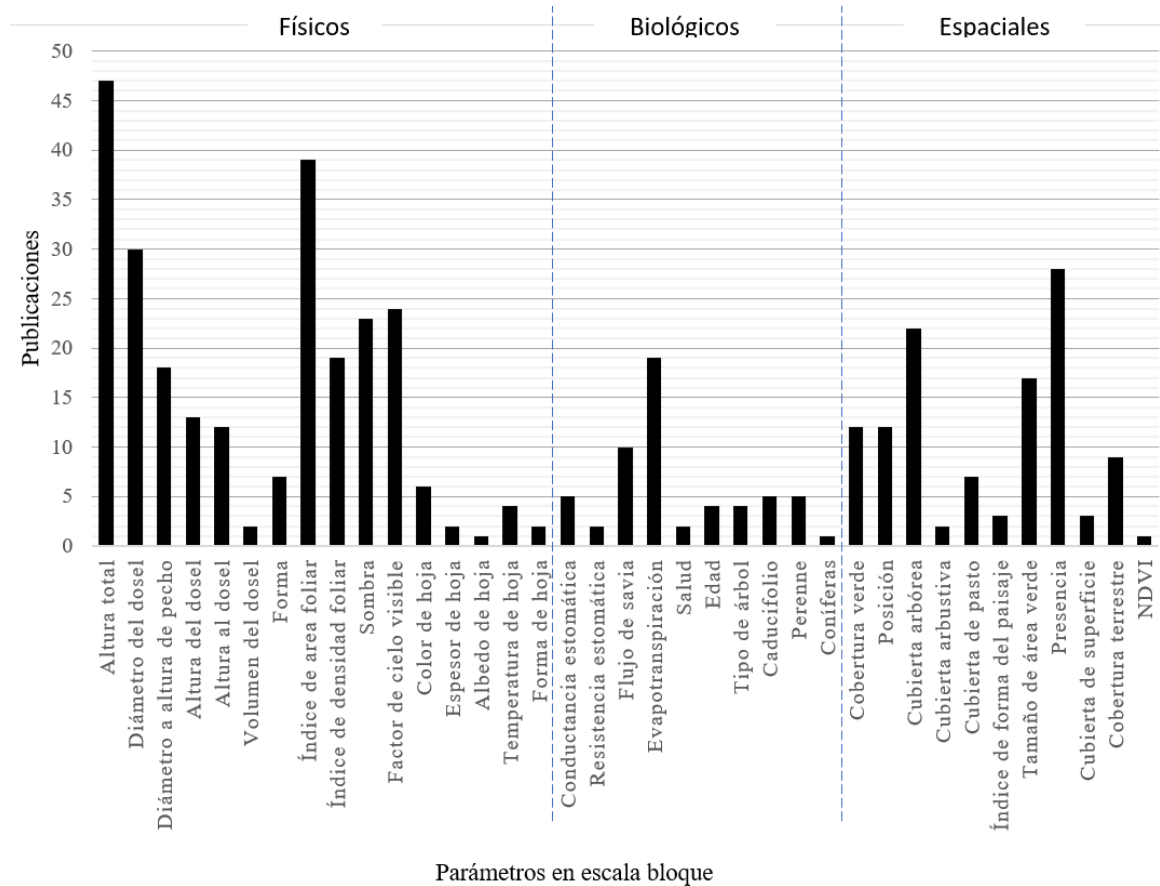


Figura 1. Número de publicaciones que analizan algún parámetro de la vegetación

#### 2.1.2.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos de la vegetación hacen referencia a la estructura de la vegetación y miden la altura, la densidad, el diámetro, la altura del tronco, la forma y otros elementos de la vegetación. Para el caso particular de esta investigación se describen con mayor detalle los parámetros de índice de área foliar, índice de densidad foliar, altura del tronco, altura total y diámetro del dosel.



a) Índice de área foliar

La cantidad de follaje en la cubierta vegetal es una de las características ecológicas básicas cuantificadas por medio del Índice de Área Foliar (IAF). El IAF es definido de acuerdo con [Deblonde et al., \(1994\)](#) y [Watson, \(1947\)](#) como la cantidad total de área de un solo lado de las hojas por unidad de área de superficie de suelo; por otro lado [Bréda, \(2008\)](#) establece que el IAF es una medición del contenido de follaje de una cubierta vegetal, se considera una unidad adimensional, y es reconocido como el atributo más importante de la estructura vegetal en estudios de ecología debido a su estructura y a la función de la vegetación en el ecosistema.

Para la obtención del IAF existen dos métodos: directos e indirectos ([Gower et al., 1999](#); [Jonckheere et al., 2004](#); [Weiss et al., 2004](#)); de acuerdo con [Jonckheere et al., \(2004\)](#) los métodos directos consisten en la recolección de hojas, tanto de forma destructiva como no destructiva, y los indirectos se refieren al método de contacto indirecto e indirecto sin contacto; Por el contrario [Bréda, \(2008\)](#) menciona que los métodos indirectos están basados en el uso de instrumentos ópticos desde la superficie terrestre y el nuevo enfoque por medio del teledetección remota, además considera que los métodos directos consumen mucho tiempo y algunos de ellos son destructivos.

Con respecto a lo anterior, en la literatura se identifica que el método indirecto sin contacto, es el de mayor uso para obtener el IAF; aunque todos los métodos tienen limitaciones y beneficios, [Jonckheere et al., \(2004\)](#) indican que el uso de las fotografías hemisféricas, es un método indirecto sin contacto, es un proceso económico que ha demostrado ser efectivo para medir diferentes componentes de la estructura de la cubierta vegetal. De acuerdo con el Manual de obtención del IAF realizado por [Melorose et al., \(2012\)](#) las fotografías hemisféricas, fotografías ojo de pez o fotografías de cubierta, estiman la radiación solar potencial y caracterizan el dosel de la vegetación, mediante el uso de fotografías tomadas mirando hacia arriba a través de una lente de gran angular que se aproxima o es igual a 180°; el proceso para la obtención es sencillo e implica la adquisición, registro, clasificación y cálculo.

Para el cálculo de IAF uno de los programas informático utilizados es Hemisfer, que contiene los métodos de cálculo de IAF de [Gonsamo et al., \(2018\)](#), [Lang, \(1987\)](#), [Miller, \(1967\)](#), [Norman & Campbell, \(1989\)](#), [Thimonier et al., \(2010\)](#) y el método de cálculo del instrumento Li-Cor LAI-2000/2200 que es una variación del método de [Miller, \(1967\)](#)). Los pasos que seguir para obtener el IAF a través de Hemisfer son: definición del sitio, definición de la geometría del lente, selección de color, configuración de límites de blanco y negro, selección de método de cálculo de IAF, régimen de luz y obtención de resultados ([Schleppy, 2020](#)).

b) Índice de densidad foliar

El índice de densidad foliar (IDF) se define como el área foliar unilateral total de tejido fotosintético por unidad de volumen del dosel (Weiss et al., 2004). De acuerdo con Béland et al., (2014), la densidad del área foliar puede especificarse en cualquier escala espacial dada (por ejemplo, a nivel de subcopa o parcela) y puede estimarse in situ utilizando alguno de los enfoques que se han clasificado como directos, semi-directos o indirectos (ver Tabla 1).

Tabla 1. Recopilación de métodos para estimar el IDF

Método	Descripción	Autor
Directo	Es necesario la cuantificación y medición de hojas	Norman & Campbell, (1989)
Semi-directo	Método de cuadrantes de punto inclinado (inclined point quadrat method)	Warren Wilson, 1960
Indirecto	Métodos ópticos (fotografías hemisféricas)	Jonckheere et al., (2004)

Nota: Elaborado a partir de información de Béland et al., (2014)

Existen métodos indirectos analíticos para la obtención del IDF a través del IAF (Ecuación 4), entre los que se encuentran los métodos propuestos por Lalic & Mihailovic, (2004), Meir et al., (2000), Ross et al., (2000), Stadt & Lieffers, (2000), el primero permite obtener el perfil del IDF con pocos parámetros y de acuerdo a la revisión de la literatura es frecuente verlo aplicado en los estudios de vegetación urbana (Bruse, n.d.).

$$IAF = \int_0^h IDF(z) dz = \int_0^h IAF_m \left(\frac{h-z_m}{h-z}\right)^n \exp\left[n\left(1 - \frac{h-z_m}{h-z}\right)\right] dz \quad Ec. [4]$$

$IDF_m$  = Valor máximo de IDF a la altura de  $z_m$

$h$  = total de altura de la planta

$z$  = Altura de la cual el valor se está usando para determinar el LAD

$n = 6$  si el valor de  $z$  está entre 0 y  $z_m$ ; y 0.5 si  $z$  está incluido entre  $z_m$  y  $z_p$

c) Altura del tronco

El término de base del tronco se refiere a la parte inferior del tronco, entre las raíces y las primeras ramas, es un concepto utilizado en el área de arboricultura que refiere a un aspecto importante para evaluar la estabilidad y función del elemento vegetal. Para obtener sus dimensiones, la forma más sencilla es medir desde la parte baja del tronco sobre la superficie, hasta las primeras ramas.



Un estudio en el que se evaluó este parámetro fue el realizado por [Morakinyo et al., \(2018\)](#), que consistió en evaluar los beneficios térmicos y energéticos de la cobertura verde de un vecindario en Hong Kong, mediante el uso de un modelo de ENVI-met para analizar distintos escenarios con valores de cobertura verde entre 0 y 32%; los resultados indican que la base del tronco ( $R^2= 0.44$ ) y la altura total del árbol ( $R^2 =0.39$ ) tienen un efecto en el bloqueo de radiación solar. Esto implica que a menor altura del tronco y del árbol se podría reducir potencialmente la incidencia solar al nivel de los habitantes, por lo que, en orden de importancia respecto a la mitigación de temperatura, la variable de altura del tronco está en segundo lugar de importancia, solo detrás del IAF.

d) Altura total

De acuerdo con [Carron, \(1968, p. 26\)](#) la altura total de un árbol se define como la “distancia desde el nivel del suelo hasta la “parte superior” (el punto más alto) del árbol”, esto suponiendo que el árbol es vertical y totalmente recto; además menciona que es difícil obtener una medición precisa de esta variable física del arbolado, la cual puede variar fácilmente aun cuando quien obtenga la medición sea la misma persona. Además, menciona que, debido a la importancia de la altura del árbol para describir el árbol, los profesionales del manejo de estos elementos han creado varios instrumentos y métodos para definir su valor cuantitativo; estos pueden ser directos o indirectos. El método directo de mayor confianza consiste en utilizar una cinta métrica hasta la parte superior del árbol por cualquier método, y el método indirecto de mayor uso es el que consiste en principios trigonométricos.

Dentro de los métodos indirectos, en la actualidad existen herramientas digitales para obtener la altura total de un árbol, una de ellas es la aplicación para teléfono móvil “Globe Observer”. De acuerdo con [GLOBE Observer, \(n.d.\)](#), está es una aplicación de ciencia ciudadana que permite a todo aquel que adquiera la aplicación realizar observaciones y con ello aportar al desarrollo de la base de datos de *Global Learning and Observation to Benefit the Environment* (GLOBE). Esta base de datos recopila información para identificar cambios en el medio ambiente y ofrece apoyo a la investigación científica del sistema terrestre e interpretación de datos de la NASA y otros satélites. Toda la información obtenida es libre y accesible para investigadores a través del programa GLOBE. Esta aplicación cuenta con herramientas para realizar observación para distintos proyectos, las cuales son *Clouds, Mosquito Habitat Mapper, Land Cover* y *Trees*; esta última es una herramienta que permite medir la altura de los árboles, y que es utilizada por el programa GLOBE para rastrear el crecimiento de los árboles, para identificar la ganancia o pérdida de la biomasa.

Algunos estudios como el de [Zhang et al., \(2018\)](#) examinan cómo la distribución y especies de árboles influyen en las condiciones ambientales en áreas residenciales de



Wuhan, China, durante el verano y el invierno. Los resultados indican que la distribución de árboles en las zonas residenciales afecta significativamente la temperatura y la humedad relativa. La presencia de árboles disminuye la temperatura y aumenta la humedad en verano, pero en invierno los árboles no tienen un impacto significativo en la temperatura. Además, menciona que la altura, el ancho de la copa y el índice de área foliar (LAI) son los principales factores que influyen en el enfriamiento y ventilación de la vegetación. Los árboles altos con un gran LAI y diámetro de copa deben ser priorizados para mejorar el confort de los entornos exteriores. Otro estudio que analiza la altura total como una variable importante en la mitigación de temperatura de aire por medio de la vegetación arbórea, es la investigación de [K. T. Huang & Li, \(2017\)](#), quienes realizaron un experimento por medio de ENVI-met y EnergyPlus para explorar el efecto de la tipología del cañón urbano y sus elementos vegetales sobre el consumo energético, como resultado se obtuvo que la relación alto-ancho del cañón urbano produce el mayor efecto sobre el consumo energético, pero también se observó que básicamente entre más alto es árbol y mayor sea su IAF, el pico de consumo energético será menor.

e) Diámetro del dosel

El dosel corresponde a la zona donde se encuentra el volumen foliar del árbol, el diámetro real del dosel debe ser medido ya que es un indicador importante de los servicios ecosistémicos de la vegetación arbórea; [Carron, \(1968, p. 49\)](#) menciona que:

“Para algunos árboles, esto se puede hacer escalando el árbol y extendiendo un poste calibrado horizontalmente. En la mayoría de los casos, los árboles o las copas son demasiado grandes para hacer esto y el diámetro de la copa se mide proyectando puntos del perímetro de la copa sobre el suelo de alguna manera y midiendo en el suelo la distancia entre esos puntos. proyecciones. Por lo general, la media se toma de dos diámetros en ángulo recto. Se utilizan o se han sugerido varios métodos para proyectar el borde de la corona hacia el suelo. Para algunos propósitos, el juicio subjetivo visual puede ser suficiente.”

De acuerdo con [Wang & Akbari, \(2016\)](#) el diámetro del dosel puede afectar la cantidad de sombra que proporciona la vegetación arbórea y, por lo tanto, su capacidad para reducir la temperatura en las zonas urbana, lo cual fue identificado mediante un estudio en el que examinaron el impacto de la plantación de árboles en las zonas urbanas de Montreal para mitigar el efecto de la isla de calor. Además, se identificó que la plantación de árboles en las áreas urbanas de Montreal puede reducir la temperatura y mejorar la calidad del aire

En el estudio de [Smithers et al., \(2018\)](#) examinaron la capacidad de diferentes especies de árboles para enfriar el ambiente urbano a través de la transpiración y la sombra.



Los resultados del estudio revelaron que las especies de árboles con mayor capacidad para transpirar, es decir, perder agua a través de las hojas, tienen un mayor impacto en la reducción de la temperatura en las zonas urbanas. Además, se observó que los árboles que proporcionan una mayor sombra también tienen un impacto significativo en la reducción de la temperatura. Se destaca que el área foliar, basada en el diámetro de la copa y el índice de área foliar, es importante para los tres mecanismos de enfriamiento: transpiración, reflexión de la radiación solar y sombra. En la Figura 2 se ilustran los parámetros físicos que tienen mayor relación con la mitigación de la temperatura.

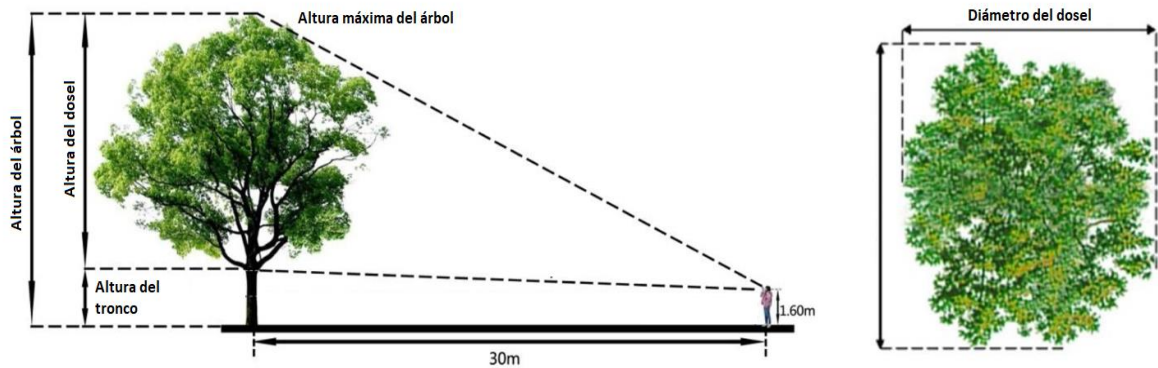


Figura 2. Parámetros de la vegetación

## 2.2 Simulación

Los espacios verdes se conforman de sistemas holísticos y dinámicos; lo cual representa un reto para generar diseños adecuados y eficientes con objetivos de minimizar el fenómeno de la ICU, entre otros problemas. Por lo que se puede abordar los problemas a través del enfoque de teoría de los sistemas dinámicos, establecida por J.W. Forrester, como un conjunto de herramientas que representan la estructura de sistemas complejos, así como el análisis de su comportamiento (Fan et al., 2007); esto se puede realizar mediante el uso de programas informáticos de simulación. De acuerdo con Shannon (1975) la simulación es el proceso de diseñar una representación sintetizada de un sistema real y realizar experimentos con él, con la finalidad de entender el comportamiento del sistema o evaluar nuevos planteamientos para el funcionamiento del sistema.

Los investigadores en temas de Arquitectura y Urbanismo han usado modelos de simulación de microclima para hacer estudios predictivos de diferentes escenarios para la planeación y diseño urbano (Hebbert & Jankovic, 2013); además Duarte & Monteiro (2016) señalan que los modelos informáticos de simulación son fundamentales en el proceso de diseño. Erell et al. (2011), mencionan que el modelado debería ser parte del proceso de diseño-toma de decisiones, ya que el uso de estos modelos permite investigar y visualizar las probables consecuencias de las propuestas de diseño; ya sea en el medio ambiente artificial, natural y/o social, siguiendo el principio ético sugerido por Bauman, (2005) que menciona que se debe visualizar los impactos futuros de todas las acciones, emprendidas o no emprendidas, antes de aplicar nuevas estrategias.

En la literatura se identificaron varios programas informáticos de simulación con la capacidad de calcular algunos efectos de la vegetación, los de mayor uso, son ENVI-met, Rayman, Solarweig y CFD\_Phoenics; de acuerdo con Toparlar et al., (2017) uno de los programas de simulación más usados en el análisis del microclima es el modelo ENVI-met y autores como Elwy et al., (2018); Hsieh et al., (2018); Liu et al., (2018); Salata et al., (2016); Tsoka et al., (2018) han generado evidencia de que es adecuado para evaluar la temperatura y ventilación del microclima urbano, en contextos simples y/o complejos.

### 2.2.1. ENVI-met

ENVI-met es un modelo micro climático tridimensional no hidrostático, que puede calcular y simular el clima en áreas urbanas con una retícula de 0.5 a 10 metros, en intervalos de 10 segundos; usando las leyes fundamentales de dinámica de fluidos y termodinámica, sus variables principales son velocidad y dirección de viento, temperatura de aire y humedad, turbulencia, bioclimatología y dispersión de gases y partículas (Bruse, 2017; Ozkeresteci et al., 2003; Rui et al., 2019). En la Figura. 3 se observa el flujo de datos para procesar la información en ENVI-met.



Figura 3. Flujo de datos generales en ENVI-met, elaborado a partir de Bruse, (2018).

Para utilizar ENVI-met se requiere trabajar con un flujo de datos para configurar el proyecto en el que se podrá proporcionar información sobre las características de la vegetación, que posteriormente podrán ser simuladas en un contexto edificado y climático específico (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los programas de ENVI-met.

Programa	Descripción
Headquarter	Se puede acceder fácilmente a los programas de la suite ENVI-met. Desde allí, es posible navegar a todas las herramientas necesarias para configurar el proyecto, crear la base de datos personalizada de materiales, digitalizar el área del modelo y, finalmente, iniciar la simulación.
Albero	Es su caja de herramientas para definir las nuevas geometrías de plantas 3D introducidas en ENVI-met. Lo apoya con la gestión de datos, la generación y modificación de plantas y se integra directamente en el nuevo sistema de base de datos ENVI-met.
Space	Hace posible digitalizar su área de modelo basada en ráster directamente en el programa u optimizar el área de modelo creada previamente en Monde u otros programas.
Envi-guide	La principal función de este programa es la de crear y editar archivos de simulación, donde se incorporan en un solo archivo, los datos creados en Albero, Space y archivos climáticos.
Envi-core	Si bien ENVI-met viene con una variedad de programas diferentes, envi-core es el verdadero caballo de batalla del paquete. En el núcleo tiene lugar la acción real, es decir, la simulación del microclima de alta resolución.

Un aspecto importante en el proceso de simulación es la validación de los modelos, de acuerdo con Pooch & Wall, (1992) la validación consiste en la comparativa entre los valores simulados de salida con los datos conocidos de entrada. Se comprueba la exactitud del modelo comparando los datos de recolección inicial con las predicciones del modelo. Es en esta fase del proceso en la que se puede requerir modificar el modelo, recolectar datos adicionales o revisar el proceso del uso del modelo.

En la revisión de literatura se identificaron 70 investigaciones que utilizaron el programa ENVI-met para estudios de mitigación de temperatura por vegetación, además el uso de la herramienta ha sido validado por distintos autores en diversas ciudades (Tabla 3), por lo que se ha demostrado el funcionamiento de la herramienta, pero por rigor científico es importante realizar la validación de cada modelo de estudio, mediante la estimación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés).





Tabla 3. Resultados de validación experimental en otros estudios

Autor	Ciudad	Variable	$R^2$	RMSE (k)
Morakinyo et al. 2019	Hong Kong	Temperatura de aire	0.89	0.5
Shizato et al. (2019)	São Paulo, Brasil	Temperatura de aire	-	0.7
Liu et al. (2018)	Ghangzhou, China	Temperatura de aire	-	1.13
Zango et al. (2018)	Malacca, Malasia	Temperatura de aire	0.84	3.2
Salata et al. (2016)	Roma, Italia	Temperatura de aire	0.88	1.89
Lee et al. (2016)	Freiburg, Alemania	Temperatura de aire	0.85	0.66
Wang et al. (2016)	Toronto, Canada	Temperatura de aire	0.69	-
Duarte et al. (2015)	São Paulo, Brasil	Temperatura de aire	-	1.61
Acero y Herranz-Pascual (2015)	Bilbao, España	Temperatura de aire	0.96	-
Ghaffarianhoseini et al. (2015)	Kuala Lumpur, Malasia	Temperatura de aire	0.96	-
Taleghani et al (2015)	Países Bajos	Temperatura de aire	-	1.00
Song y Park (2015)	Changwon, Corea del sur	Temperatura de aire	0.52	4.83
Janicke et al. (2015)	Berlín, Alemania	Temperatura de aire	0.87	1.39
Conry et al. (2015)	Chicago, EUA	Temperatura de aire	-	0.87
Wang y Zacharias (2015)	Beijing, China	Temperatura de aire	0.81	-
Qaid y Ossen (2015)	Putrajaya, Malasia	Temperatura de aire	0.69	1.82
Middel et al. (2014)	Phoenix, EUA	Temperatura de aire	-	1.74
Hedquist and Brazel (2014)	Phoenix, EUA	Temperatura de aire	0.89	2.9
Muller et al. (2014)	Oberhausen, Alemania	Temperatura de aire	0.97	-

Nota: Elaborado a partir de información de [Salata et al., \(2016\)](#).

### 2.3. Estadística

La estadística se ocupa de los métodos científicos que se utilizan para recolectar, organizar, resumir, presentar y analizar datos, así como para obtener conclusiones válidas y tomar decisiones razonables con base en este análisis. El término estadística también se usa para denotar los datos o los números que se obtienen de esos datos; por ejemplo, los promedios. Así, se habla de estadísticas de empleo, estadísticas de accidentes, etcétera ([Stephens & Spiegel, 2009](#)). El análisis estadístico significa investigar tendencias, patrones

y relaciones utilizando datos cuantitativos. Es una importante herramienta de investigación utilizada por científicos, gobiernos, empresas y otras organizaciones (Scribbr, n.d.).

De acuerdo con Acevedo, (2012) para abordar el análisis cuantitativo de problemas, podemos utilizar el siguiente marco metodológico general: Definición del problema; Obtención y organización de datos; Exploración de datos; Identificación de métodos, hipótesis y pruebas; Análisis e interpretación y finalmente basados en los resultados regresar a algún paso anterior (ver Tabla 4).

Tabla 4. Proceso

Pasos de análisis estadístico	Descripción
1. Definición del problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Definir las preguntas a ser respondidas por el análisis</li> <li>b. Definir posibles suposiciones que podrían simplificar las preguntas</li> <li>c. Identificar componentes y sus relaciones con la ayuda de diagramas de bloques gráficos y mapas conceptuales</li> <li>d. Identificar dominios y escalas en tiempo y espacio</li> <li>e. Identificar los datos requeridos y las fuentes</li> <li>f. Diseñar experimentos para la recopilación de datos</li> </ul>
2. Obtención y organización de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Mediciones y experimentos</li> <li>b. Recopilación de datos disponibles</li> <li>c. Organizar archivos de datos y metadatos</li> </ul>
3. Exploración de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Variables, unidades</li> <li>b. Variables independientes y dependientes</li> <li>c. Análisis exploratorio de datos</li> <li>d. Correlaciones de datos</li> </ul>
4. Identificación de métodos, hipótesis y pruebas	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Identificar hipótesis</li> <li>b. Identificar métodos y su validez dados los datos.</li> </ul>
5. Análisis e interpretación de resultados	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Realizar cálculos</li> <li>b. Respuesta a las preguntas que motivaron el análisis</li> <li>c. Describa los límites de estas respuestas dadas las suposiciones</li> <li>d. Próximos pasos y nuevas hipótesis</li> </ul>

Nota: Elaborado a partir de información de Acevedo (2012).

### 2.3.1. Tipos de estadística

#### 2.3.1.1. Descriptiva

A la parte de la estadística que únicamente trata de describir y analizar un grupo dado, sin sacar ninguna conclusión ni hacer inferencia alguna acerca de un grupo más grande, se le conoce como estadística descriptiva o deductiva. (Stephens & Spiegel, 2009). De acuerdo con Research Prospect, (n.d.) las estadísticas descriptivas resumen las características de un conjunto de datos; Consta de dos categorías básicas de medidas: medidas de variabilidad y medidas de tendencia central. Las medidas de variabilidad

describen la dispersión de los datos en el conjunto de datos y las medidas de tendencia central definen el centro de un conjunto de datos.

### ***2.3.1.2. Inferencial***

Si la muestra es representativa de la población, el análisis de la muestra permite inferir conclusiones válidas acerca de la población. A la parte de la estadística que se ocupa de las condiciones bajo la cuales tales inferencias son válidas se le llama estadística inductiva o inferencial. Como estas inferencias no pueden ser absolutamente ciertas, para presentar estas conclusiones se emplea el lenguaje de la probabilidad (Stephens & Spiegel, 2009). La estadística inferencial se utiliza para estimar la probabilidad de que los datos recopilados se hayan producido por casualidad o de otra manera; además ayuda a concluir una población más grande de la que tomó muestras y depende del tipo de escala de medición junto con la distribución de datos (Research Prospect, n.d.).

### ***2.3.2. Diseño experimental.***

De acuerdo Badii, et al., (2017) y Mandeville, (2012) el diseño experimental es un plan o estructura que describe cómo llevar a cabo un experimento, siendo su objetivo principal determinar si hay una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos o condiciones del experimento y, en caso afirmativo, cuál es la magnitud de esa diferencia. Además, los diseños experimentales también tienen como objetivo detectar cualquier tendencia o patrón en los datos recopilados durante el experimento. La principal diferencia entre los diferentes diseños experimentales radica en cómo se agrupan o clasifican las unidades experimentales.

Los tratamientos son procedimientos aplicados a unidades experimentales. Un factor es un grupo de tratamientos, y sus categorías se llaman niveles del factor. El efecto de un factor es el cambio en la respuesta debido a un cambio en su nivel. Los factores cuantitativos tienen niveles en una escala ordenada, mientras que los factores cualitativos representan categorías nominales no ordenables (Mandeville, 2012). El diseño del experimento implica definir las variables a controlar y las variables a probar, también conocidas como tratamientos; además, se deben determinar los objetos de estudio, el espacio físico donde se realizará el experimento y las variables a medir como respuesta a los tratamientos (Montoya Márquez et al., 2011).

### ***2.3.3. Correlación y regresión***

La correlación y regresión son medidas de análisis estadístico que se utilizan para establecer conexiones entre dos variables, medir las conexiones y generar predicciones. Específicamente la correlación mide la relación entre variables y se identifica cuando un cambio en una variable es seguido por un cambio en otra variable, ya sea directa o indirecta, las variables se consideran "no correlacionadas" cuando un cambio en una no afecta a la



otra; mientras que la regresión se identifica cuando una variable afecta a otra o cuando ocurren cambios en una variable que desencadenan cambios en otra, es decir causa y efecto, lo que implica que el resultado depende de una o más variables (Calvello, 2020). En la Tabla 5 se pueden identificar las diferencias.

Tabla 5. Diferencias entre correlación y regresión.

Ventajas	Correlación	Regresión
Quando utilizar	Para establecer relaciones directas entre dos variables	Para predecir o establecer respuestas numéricas
Cuantifica la dirección de las relaciones	Sí	Sí
Cuantifica la fuerza de las relaciones	Sí	Sí
Muestra causa y efecto	No	Sí
Predice y optimiza	No	Sí
Utiliza una ecuación matemática	No	$y = a + b(x)$

Nota: Traducido de (Calvello, 2020).

### 2.3.3.1. Análisis multivariante

El análisis multivariante se considera una ramificación del análisis estadístico que se enfoca en el estudio de dos o más variables o características simultáneas medidas en un objeto (Kachigan, 1991); al respecto Closas et al., (2013) menciona que las técnicas multivariantes se centran en el análisis de las covarianzas o correlaciones que representan las relaciones entre tres o más variables a diferencia de las uni y bivariantes que se enfocan en el análisis de la media y la varianza de una sola variable. Dentro de este tipo de análisis se encuentran dos opciones a seguir: el análisis multivariable (de dependencia) y el análisis multivariado (de interdependencia); el primero se utiliza cuando tenemos una o varias variables dependientes que pueden ser predecidas o explicadas por otras variables, en el caso de las segundas, se utiliza cuando no tenemos definido las variables dependientes o independientes (Hair et al., 2010).

### 2.3.4. Componentes principales y análisis factorial

De acuerdo con Tapia & García, (2001), hay una clase de métodos estadísticos que tienen como objetivo el definir la estructura oculta de un conjunto de datos que permite analizar las interrelaciones que existe entre variables, factores y componentes, estos métodos son los componentes principales y el análisis factorial.

El análisis estadístico convierte las variables correlacionadas en un nuevo grupo de variables no correlacionadas (Almenar et al., 1998); el análisis tiene por objetivo el determinar patrones de tendencias en los sistemas ecológicos (Torriente & Torres, 2010) este método es apropiado cuando la intención principal se enfoca en la predicción (Tapia & García, 2001). El análisis factorial es una técnica de interdependencia que toma en cuenta todas las variables al mismo tiempo, en la cual todas las variables están interrelacionadas, este método tiene como objetivo principal identificar las dimensiones latentes o las construcciones representadas en el conjunto de variables estudiadas (Tapia & García, 2001).

### 2.3.5. Modelo matemático

De acuerdo con Meyer, (1971), se describen dos tipos de modelos matemáticos: modelos deterministas y modelos estocásticos. Los modelos deterministas se basan en ecuaciones matemáticas que describen las relaciones entre las variables y los parámetros involucrados, y permiten predecir valores futuros con precisión. Por otro lado, los modelos estocásticos son aquellos que incluyen incertidumbre o variabilidad en la descripción de los fenómenos que se están modelando, y se basan en la teoría de probabilidades para obtener resultados. Estos modelos son útiles para simular sistemas complejos en los que no es posible conocer todas las variables que intervienen.

#### 2.3.5.1. Validación de modelos

Debes incluir métodos para evaluar la precisión y la capacidad predictiva de tu modelo. Esto podría implicar el uso de métricas de evaluación de modelos, como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error medio cuadrático (RMSE) (Ecuación 5) o el error absoluto medio (MAE). Mediante la estimación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (Ecuación 6) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad Ec. [5]$$

$RMSE =$  Raíz del error cuadrático medio

$P_i =$  Previsiones (valores esperados o resultados desconocidos)

$O_i =$  Valores observador (resultados conocidos)

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad Ec. [6]$$

$R^2 =$  Coeficiente de determinación

$\hat{Y}_i =$  Valores ajustados

$Y_i =$  Observación

$\bar{Y} =$  Media de observaciones

### Capítulo 3: Método

El objetivo de este apartado es determinar los atributos del estudio, de modo que permita su entendimiento y verificabilidad, para ello se definió la caracterización del estudio, del experimento, la instrumentación y los métodos de análisis de datos; de tal manera que la agrupación de etapas, técnicas y métodos que se utilizarán para resolver el problema de esta investigación.

El estudio actual tiene un enfoque cuantitativo, que de acuerdo con (Hernández Sampieri et al., 2006) se caracteriza por ser secuencial, probatorio y hacer uso de la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías.

De acuerdo con la hipótesis, y los objetivos del estudio, se establece que la investigación es experimental, ya que se busca determinar la relación de causa y efecto mediante simulación informática, por lo que se realizó un experimento cuasiexperimental, el proceso se realizó por medio de una herramienta informática ya que se simulan escenarios determinados por el autor, modificando las variables de la vegetación para determinar la interrelación y el efecto en la mitigación de temperatura del aire.

Se llevaron diferentes fases en la investigación, la delimitación, experimentación y modelación. La delimitación se precisa y acota las variables que se consideran; la experimentación es el estudio del fenómeno llevado a cabo en las condiciones del simulador para obtener el control de las variables y finalmente, el modelado que es la simplificación del fenómeno a través de una ecuación matemática que pueda explicar la relación de las variables con la variable dependiente. Cada una de estas fases incluyen varios pasos esenciales que guían el proceso de investigación, desde la definición del alcance hasta el desarrollo de modelos predictivos que tienen implicaciones prácticas. Esta práctica de estructurado por fases (Figura 4) nos facilita mantener el enfoque, obteniendo una investigación exhaustiva y sistemática, permitiendo obtener conclusiones más claras y prácticas.

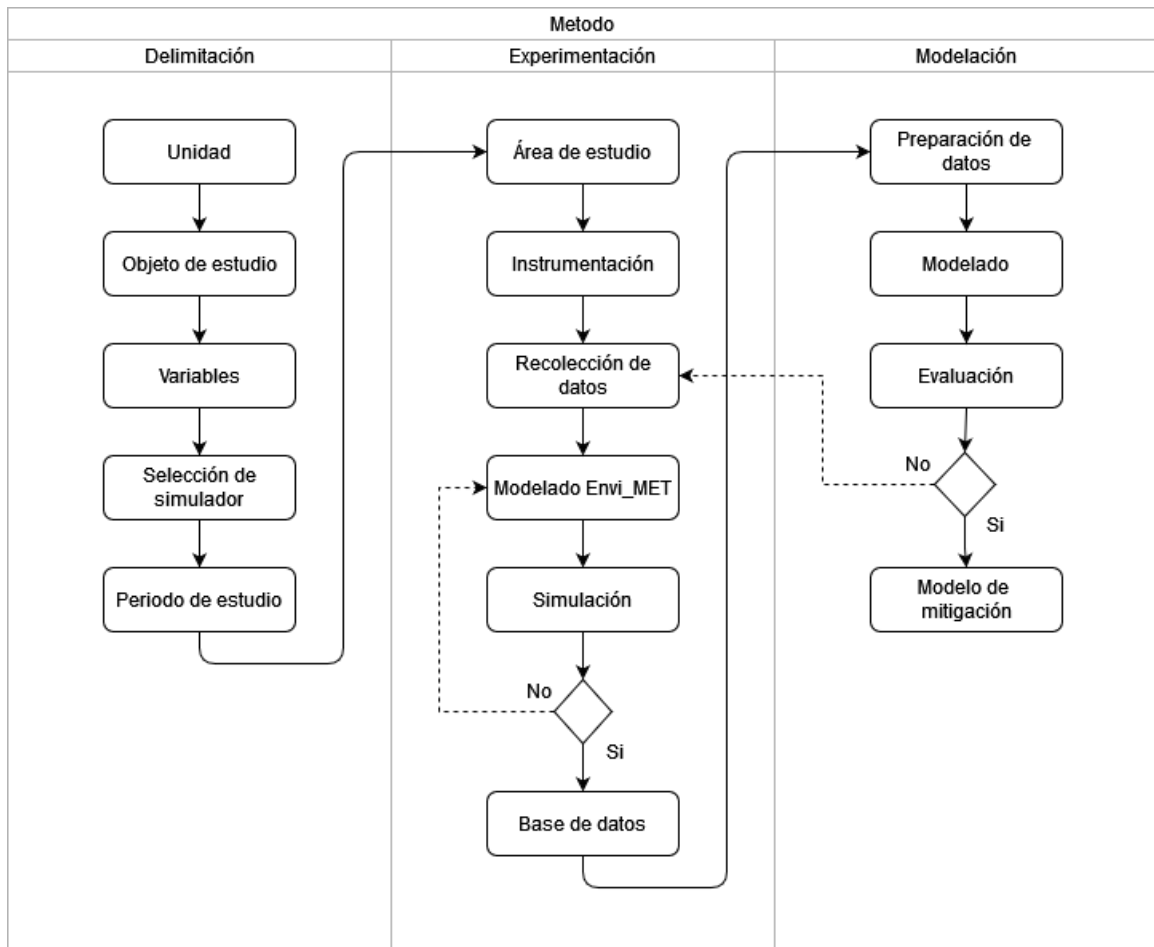


Figura 4. Diagrama de marco metodológico

### 3.1. Delimitación

#### 3.1.1. Unidad de análisis

De acuerdo con el objeto de estudio, la unidad de análisis será la **vegetación arbórea** que tenga características **aptas** para su uso en **espacios públicos** de la ciudad de Chihuahua, Chih. México.

#### 3.1.2. Objeto de estudio

Para esta investigación se analiza el fenómeno de **mitigación de temperatura del aire causado por la vegetación arbórea**, esto se refiere a la mitigación que es causada por la vegetación debido a sus características de sombreado (bloqueo de radiación solar) y evapotranspiración (aumento de la humedad).



### 3.1.3. Variables

En la revisión de la literatura se identifican 3 tipos de variables para la investigación de la mitigación de temperatura ocasionada por vegetación, las cuales son físicas, biológicas y de distribución; las físicas fueron las principales variables a usar cuando se estudiaba el fenómeno a microescala. Dentro de las variables físicas las más usadas son: altura total (24.27%), índice de área foliar (23.85%) y diámetro de dosel (18.83%). En cuanto a las variables climáticas [Livesley et al., \(2016\)](#) menciona que estas variables deben de considerarse en cualquier modelo que quiera determinar los servicios ecológicos de la vegetación ya que tienen influencia directa e indirecta en la vegetación (Tabla 6).

Tabla 6. Variables

Dimensión	Variable independiente	Variable de control	Variable dependiente	Indicador	Instrumento
Variables de vegetación	Índice de área foliar			m <sup>2</sup> m <sup>2</sup>	Hemisfer
	Diámetro de dosel			m	Cinta métrica
	Altura del árbol			m	Global Observer App
	Altura de tronco			m	Cinta métrica
Variables climáticas		Temperatura del aire		°C	
		Humedad relativa		%	
		Velocidad del viento		m/s	Estación meteorológica
		Radiación solar		w/m <sup>2</sup>	
			Mitigación de temperatura		K

### 3.1.4. Selección de simulador

A través de la revisión de literatura, se encontraron diversos programas de simulación que son usados para el estudio de la mitigación de temperatura de aire en diversas publicaciones internacionales, de los cuales el primero lugar se encuentra ENVI-met con un 36.7% (Figura 5) de los artículos que presentaban experimentación, seguido por publicación



donde no mencionan el programa que fue utilizado y en tercer lugar el ArcGis, principalmente en estudios a escala ciudad.

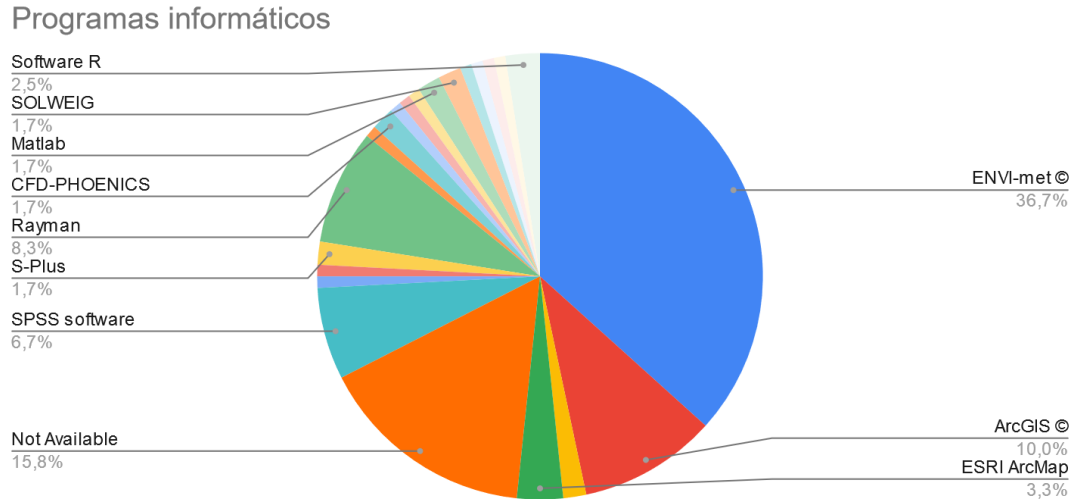


Figura 5. Porcentaje del uso de programas informáticos en publicaciones internacionales.

Este programa cuenta con la ventaja de utilizar dos sistemas paralelos, el balance térmico y la dinámica de fluidos computacionales; además existe evidencia científica de su validación en varias publicaciones internacionales, donde ha mostrado un R2 promedio de 0.83, con un mínimo de 0.52 y un máximo de 0.97; un RMSE promedio de 1.73, mínimo de 0.5 y máximo de 4.83 (Salata et al., 2016). Véase Tabla 3.

### 3.1.5. Periodo de estudio

De acuerdo a los datos obtenidos del archivo .EPW del programa informático Meteororm, se obtuvieron los datos meteorológicos característicos específicos de la ubicación de donde se realizará la experimentación con el programa informático ENVI\_met, estos datos fueron analizados para determinar primeramente el mes con el mayor porcentaje de horas de no confort ocasionado por sobrecalentamiento, para lo anterior se estimó la temperatura neutra y rango de confort térmico anual a través del uso de la fórmula de Auliciems & Szokolay, (1997):

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_{med} \quad \text{Ec. [7]}$$

Donde:

T<sub>n</sub> = Temperatura neutra



Tmed = Temperatura media anual

$$Rc = Tn \pm 2.5 \quad Ec. [8]$$

Donde:

Rc = Rango de confort

La temperatura media anual (Tmed) fue obtenida visualizando los datos del archivo EPW a través de la aplicación Climate Consultant 6.0, el cual mostraba las temperaturas medias mensuales (Tabla 7).

Tabla 7. Datos de temperaturas medias mensuales obtenidas del archivo climático EPW a través del Climate consultant 6.0.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Tmed
Tmm	11	13	17	22	26	28	27	25	23	20	14	10	19.7

$$Tn = 17.6 + 0.31 (19.7)$$

$$Tn = 23.7^{\circ}C$$

$$Rc = 23.7 \pm 2.5$$

$$Rc = 21.2 - 26.2^{\circ}C$$

Obtenido el rango de confort, y haciendo uso de la aplicación de Andrew Marsh “Data View 2D”, se analizaron los datos mensuales y se compararon con el rango de confort térmico, de tal manera que se obtuvo el porcentaje de horas fuera del rango de confort térmico, ocasionado por sobrecalentamiento que se presentan en cada mes; estos datos nos permiten identificar qué mes es el más crítico en la falta de confort térmico, véase tabla 8.

Tabla 8. Caracterización de temperatura mensual de la ciudad de Chihuahua, Chih, México

Mes	Temperatura Minima Normal (°C)	Temperatura Media Normal (°C)	Temperatura Máxima Normal (°C)	Horas de sobrecalentamiento (%)
Enero	3.9	11.1	19.2	0.5
Febrero	6.1	14.0	22.4	4.5



Marzo	10.1	17.9	25.8	13.5
Abril	14.3	22.0	29.4	28.2
Mayo	19.0	26.4	33.4	49.9
Junio	21.8	28.1	34.1	63.0
Julio	22.0	27.3	32.5	59.6
Agosto	20.1	25.5	30.9	45.1
Septiembre	18.1	23.5	29.2	30.2
Octubre	13.2	20.2	27.6	16.7
Noviembre	7.1	14.7	22.8	2.8
Diciembre	2.9	10.6	19.3	0

Una vez identificado que el mes de junio cuenta con el mayor número de horas fuera del rango de confort térmico, se obtuvo los datos horarios de las temperaturas medias normales de este mes para identificar el día representativo, el cual determinará los valores de las variables climáticas del experimento.

Para obtener el día representativo, se tabularon los datos horarios de temperaturas medias normales del mes de Junio (datos que se obtuvieron del archivo climático EPW), con lo cual se obtuvo la temperatura promedio horaria del mes en cuestión, después se procedió a identificar el día que estuviera más cercano a la temperatura promedio horaria con rango de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  (véase apéndice A); el día que tuvo mayor parecido a las temperaturas promedio horaria del mes de junio, fue el día 12.

## 3.2. Experimentación

### 3.2.1. Área de estudio

El área de estudio es un caso hipotético, una zona de 50 x 50 x 50 m (Figura 6), suelo natural sin recubrimiento vegetal o impermeable, sin ningún elemento además del árbol. Las condiciones atmosféricas se consideraron las obtenidas con el programa METEONORM, con las coordenadas del CIMAV (28.71662105054633, -106.13394905753033)



Figura 6. Representación simple del área de estudio; izquierda vista en planta; derecha vista en alzado.

### 3.2.2. Instrumentos

#### 3.2.2.1. Global Observer

Es una aplicación de ciencia ciudadana que permite realizar observaciones y con ello contribuir con el desarrollo de la base de datos de "Global Learning and Observation to Benefit the Environment (GLOBE)". Esta base de datos recopila información para identificar cambios en el medio ambiente y contribuir a la investigación científica del sistema terrestre e interpretación de datos de la NASA y otros satélites. Esta aplicación cuenta con varias herramientas para realizar observación para distintos proyectos, las cuales son "Clouds", "Mosquito Habitat Mapper", "Land Cover" y "Trees"; de las herramientas anteriores es de interés específicamente "Trees" que es una herramienta que permite medir altura de los árboles, y que es utilizada por el programa GLOBE para rastrear el crecimiento de los árboles y así poder comprender la ganancia o pérdida de la biomasa.

Algunas recomendaciones antes de iniciar el uso de la aplicación:

- Árboles preferentemente de 5 metros de alto en adelante
- Árboles preferentemente derechos
- Árboles en que se pueda visualizar sin obstrucciones la base y su punto más alto, desde una distancia de entre 7 y 25 metros.

La aplicación es sencilla de utilizar y permite al usuario realizar los cálculos a través de simple trigonometría usando los datos obtenidos de las mediciones. En la Figura 7 se muestra el proceso para estimar la altura del árbol.

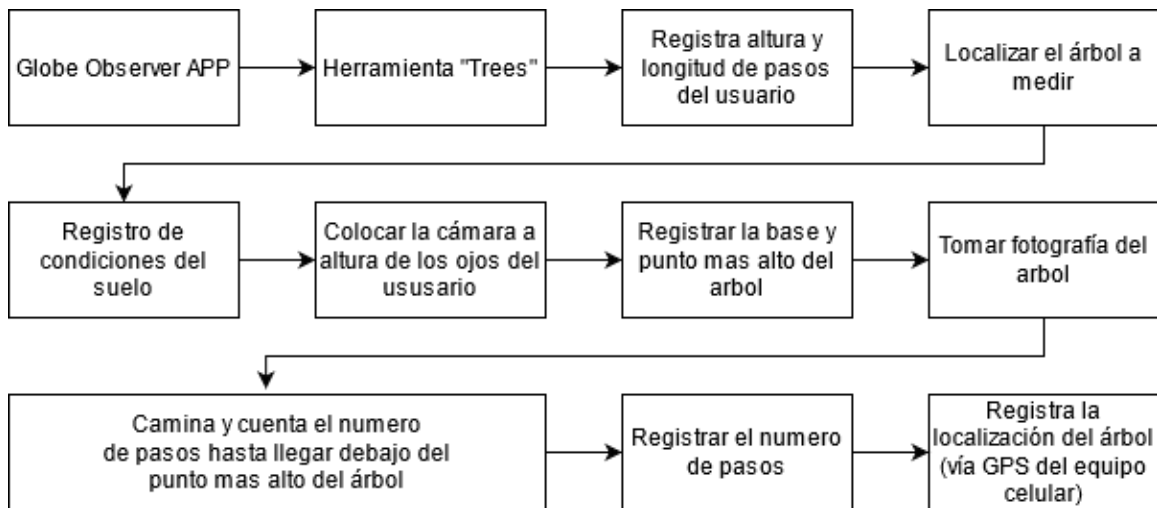


Figura 7. Pasos para seguir en el uso de la aplicación Goble Observer, Trees.

### 3.2.2.2. *Meteonorm*

El programa informático Meteonorm, que utiliza una base de datos climática global puede generar daños típicos precisos y representativos para cualquier lugar de la tierra; esta base de datos consta de 8000 estaciones meteorológicas, cinco satélites geoestacionarios y una climatología de aerosoles calibrada globalmente (Figura 8).



Figura 8. Proceso para la obtención de archivo climáticos en Meteonorm 7

Para la obtención de un archivo climatológico por medio del programa informático Meteonorm 7, se siguieron los siguientes pasos:

- 1.- Localizar el área de estudio a través de mapa, coordenadas decimales o estación meteorológica registrada más cercana
- 2.- Determinar si hay condiciones específicas en el área de estudio, como inclinaciones del terreno, albedo, el tipo de espacio (valle, depresión, lago, etc).
- 3.- Determinar qué información se usará (datos de meteonorm 7 o datos importados), periodos de tiempo para temperatura y radiación (2000-2009, 1961-1990, o escenarios futuros).
- 4.- Formato de archivo de salida, determinar para qué programa informático se usará (ya que algunos programas piden configuraciones especiales en los archivos climatológicos para poder ser utilizados).
- 5.- Obtención de datos de salida (archivo climático)



### 3.2.2.3. Hemisfer

Hemisfer es un programa informático diseñado para estimar el índice de área foliar (LAI) y el régimen de luz de fotografías hemisféricas. En la Figura 9 se observa el proceso para estimar el índice de área foliar mediante Hemisfer.

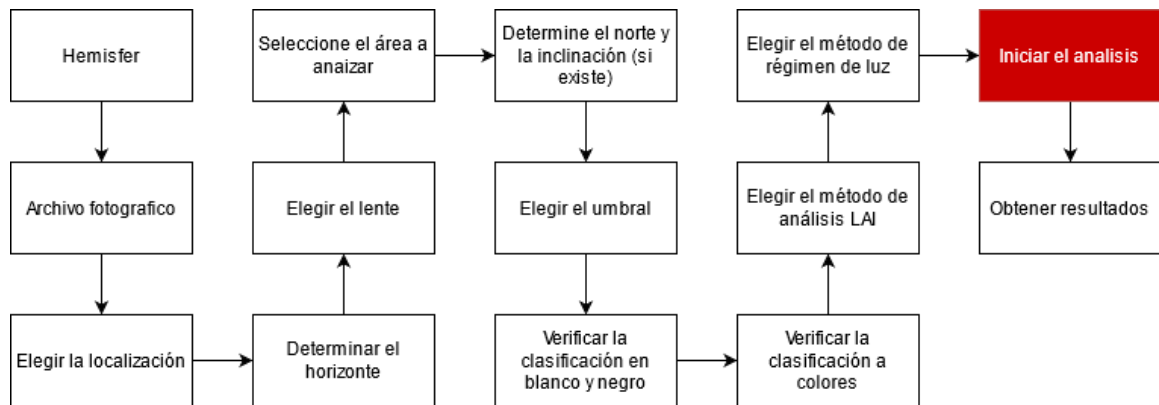


Figura 9. Pasos para seguir en el uso del programa Hemisfer 3

Este programa informático utiliza diferentes modelos de estimación del Índice de Área foliar a través de la medición de luz directamente debajo del volumen foliar por medio de fotografías hemisféricas; estos modelos han sido publicados por Miller, (1967)[9], Lang, (1987)[10], Gonsamo et al., (2018), Norman & Campbell, (1989)[11] y Thimonier et al., (2010)[12].

$$L = 2 \int_0^{\pi/2} K(\theta) \sin\theta d\theta \quad \text{Ec. [9]}$$

$$L = 2(a + b) \quad \text{Ec. [10]}$$

$$L = \frac{\left[ \left(1 - \frac{1}{2K}\right) Fb - a \right] \ln\left(\frac{LAI_d}{LAI_a}\right)}{A(1 - 0.47 Fb)} \quad \text{Ec. [11]}$$

$$K(\theta_v) = G(\theta_v, X) L_e = -\ln [T(\theta_v)] \cos\theta_v \quad \text{Ec. [12]}$$

### 3.2.2.4. Cámara fotográfica

Para poder obtener las imágenes hemisféricas necesarias para el desarrollo de la obtención del índice de área foliar, se utilizó una cámara Canon 80D (Figura 10), lente EF-



S 18-135mm IS (Figura x) y USM con lente Canon EF8-15MM f/4I FishEye (Figura 11).

La cámara Canon 80D cuenta con las siguientes características:

- 24.2 Megapíxeles
- Procesador Digic 6
- Conectividad WiFi y NFC
- Video Full HD.
- 7 cuadros por segundo
- Video Snapshot
- Pantalla de ángulo variable táctil
- Transmisor Speedlite integrado
- Avanzado sistema AF reticular de alta densidad de 45 puntos todo tipo cruz extremadamente sensibles y rápidos en el enfoque
- ISO 16,000 en fotografía (12,800 en video)
- Filtros creativos
- Mejora del mecanismo de control del espejo que reduce la vibración y minimiza el movimiento de la cámara para obtener una imagen más nítida
- Función de exposición múltiple y HDR
- Time Lapse Movie: Intervalómetro y temporizador de exposición integrados
- Visor inteligente II con cobertura del 100% aprox.



Figura 10. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, cámara Canon 80D, lente EF-S 18-135mm IS



Figura 11. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM

Tabla 9. Especificaciones de lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM

Especificaciones de lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM	
Longitud focal y apertura máxima:	15mm f/4.0
Construcción de lente:	14 elementos en 11 grupos
Angulo diagonal de visión:	180°
Ajuste de enfoque:	Extensión de lente mediante el enfoque interno y la leva de enfoque, más el mecanismo flotante
Distancia mínima de enfoque:	0.16 m/6.2pulg.
Tamaño del filtro:	Sujetador de Gel Posterior (permite hasta 3 filtros de gel pre cortados)
Máximo diámetro x longitud, peso:	3.1” x 3.7”, 19.1 oz/78.5 x 83.0 mm, 540 g

### 3.2.3. Recolección de datos

Con la finalidad de obtener los rangos de IAF de la vegetación se realizó un análisis (Tabla 10) mediante el Software Hemister de elementos vegetales arbóreos presentes en áreas verdes en la ciudad de Chihuahua (Figura 12), específicamente de Ciudad deportiva, Parque Cantera, Parque extremo, Parque Los tronquitos y Parque El Palomar.



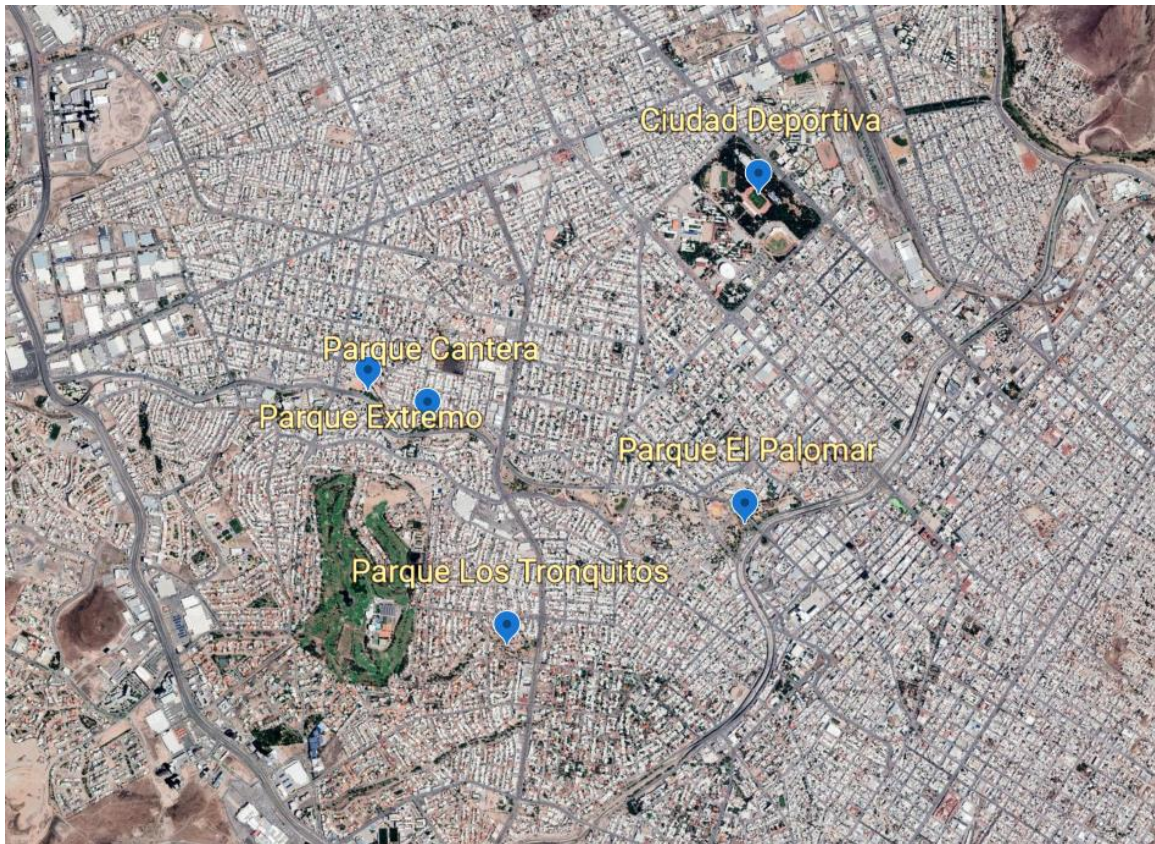


Figura 12. Instrumentos para la obtención de imágenes hemisféricas, lente EF 8-15mm f/4L Fisheye USM

Tabla 10. Método para la obtención del IAF en el programa informático Hemisfer

Actividad	Descripción
<b>Adquisición de las fotografías</b>	Debe obtenerse en condiciones sin radiación directa para evitar efectos no deseados que afectan su procesamiento, tener conocimiento de la orientación, (zenit y acimut) y una montura para la cámara que tenga manera de ser nivelada para asegurar que se enfoca directo al zenit.
<b>Registro de fotografías</b>	Se debe homologar el centrado, tamaño (alinear los bordes de fotografía y horizonte) y rotación (emparejar el acimut con respecto a la dirección de la brújula) de la fotografía con el sistema de coordenadas esférico utilizado.
<b>Clasificación de fotografías</b>	Se identifica que pixeles representan la dirección del cielo visible (no oscurcidas) y no visible (oscurcidas); se recomienda el uso de identificación automática en función de reconocimiento de color.
<b>Cálculo</b>	Utiliza un conjunto de instrucciones definidas, ordenadas y acotadas que calculan la fracción de brecha con base en la dirección del cielo y determina la geometría deseada del dosel y/o índices de radiación solar, incluido el IAF.

Para la recopilación de la información, se creó una tabla (Tabla 11) que contiene el número de la fotografía analizada, nombre de la fotografía, nombre común del árbol fotografiado, lugar de su ubicación, IAF obtenido con cada uno de los modelos accesibles en Hemisférico, y promedio de IAF.

Tabla 11. Fragmento de tabla de determinación de IAF

#	Archivo	Nombre común	Lugar	Modelos de índice de área foliar							Promedio
				Miller	LiCor	Lang	Gonsamo et al.	Norman et al.	Thimonier et al.		
1	IMG_7053_Moro_1.JPG	Moro	D	4.51	3.81	4.53	3.15	3.57	3.52	3.85	
2	IMG_7055_Lila_1.JPG	Lila	D	3.94	3.48	3.99	2.87	3.16	3.27	3.45	

### 3.2.4. Envi-Met

Del elemento arbóreo: Los casos a evaluar fueron determinados a través de los rangos máximos y mínimos de las variables “Altura del árbol” (5-25m) y “Diámetro del árbol” (3-9m) (Tabla 12) se obtuvieron de la tabla de árboles recomendados para su uso urbano publicados en el Reglamento de Desarrollo Urbano Sustentable del Municipio de Chihuahua (véase Anexo A); la variable “Altura de tronco” se definió considerando las alturas de poda comunes (2-4m); la variable “índice de área foliar”(1-6m<sup>2</sup>m<sup>2</sup>) se obtuvo a través del estudio en cambio de recolección de datos ya descrito anteriormente

Tabla 12. Valores de las variables de la vegetación a utilizar para la simulación de escenarios.

Variable	Valor Mínimo	Valor Medio	Valor Máximo
Índice de área foliar (m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> )	1	3.5	6
Altura del árbol (m)	5	15	25
Diámetro del dosel (m)	3	5	9
Altura de tronco (m)	2	3	4

Para la creación de elemento arbóreos se hizo uso del programa Minitab 20.3, usando la opción de creación de diseño de experimentos, siguiendo estos pasos: Archivo > Nuevo >

Proyecto; después teniendo una página limpia elegimos: Estadística > DOE > Factorial > Crear diseño factorial. Una vez en la ventana de creación de diseño factorial elegimos: Diseño factorial completo general > Numero de factores 4 (uno por cada variable) > Diseños > Numero de niveles (por factor) 3 > Numero de replicas 1 > Aceptar. Después entramos en el menú de “Factores” en la ventana de “crear diseño factorial” y asignamos el tipo de variable a cada variable (numérico) y asignamos cada valor de los diferentes niveles de cada factor (Véase tabla 13) y todos los demás menús y opciones dejamos las que se encuentran por defecto; damos “Aceptar” en el menú de “Crear diseño factorial” y obtuvimos las “corridas base” o escenarios de simulación, véase Apéndice C.

Tabla 13. Resumen de diseño factorial (niveles 3,3,3,3)

Factores:	4	Réplicas:	1
Corridas base:	81	Total de corridas:	81
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Con los elementos arbóreos definidos a estudiar, se procedió a modelarlos en el subprograma de ENVI\_met llamado “Albero” creando 81 diferentes modelos de elementos arbóreos, véase figura 13.

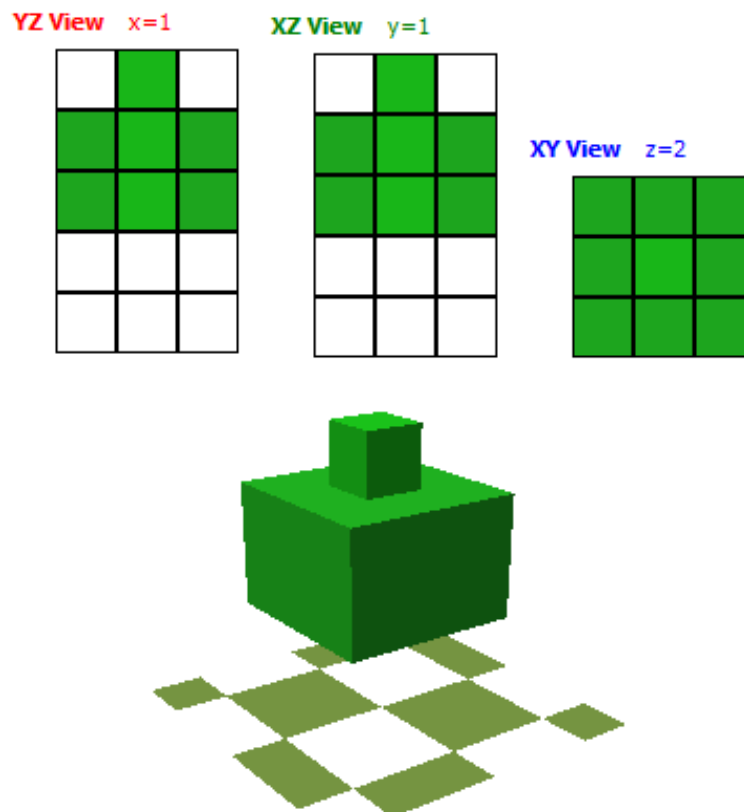


Figura 13. Ejemplo de modelo arbóreo (escenario 1, 10 y 19).

Del escenario experimental: El área de simulación 3D (dominio computacional) se realizó haciendo uso del subprograma de ENVI\_met llamado “Spaces”, el área tiene una dimensión de  $52 \times 52$  m y una altura vertical de 52 m. El área está mallada utilizando una cuadrícula rectangular con 125,000.00 celdas, con una resolución de cuadrícula de  $1.0 \times 1.0 \times 1.0$  m. Se colocaron receptores de información en dirección sur y norte, a distancias de 1, 3, 6, 9m y uno central (Figura 14), para poder obtener directamente los valores de los elementos climáticos en esos puntos específicos. El elemento arbóreo se localizó justo en el centro del área en la celda 26 X y 26 Y, véase Figura 15.

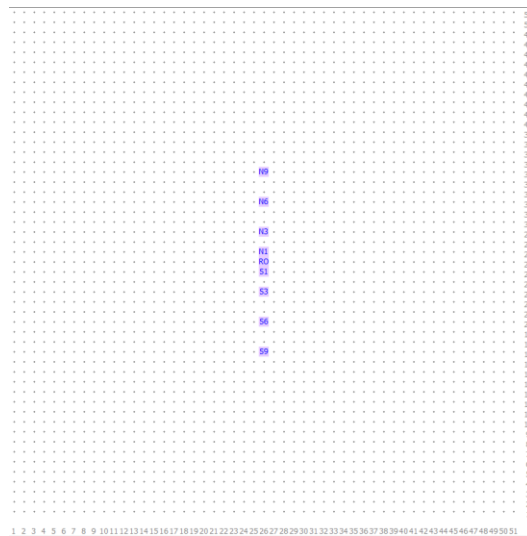


Figura 14. área de escenario de experimentación con localización de receptores

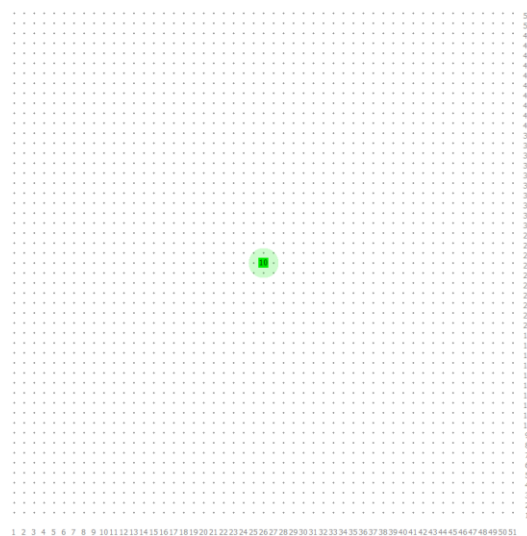


Figura 15. Área de escenario de experimentación con localización de elemento arbóreo

De las condiciones atmosféricas: Las condiciones meteorológicas se determinó la información a través de un archivo climático (.EPW) obtenido del software Meteonorm 6.0. En la Tabla 14 se muestran las condiciones a utilizar en ENVI-met para la simulación.

Tabla 14. Condiciones límite para simulación

Parámetros	Definición	Valores
Localización	Chihuahua. Chih. México	
	Latitud, Longitud	28.6352, -106.08888
Condiciones meteorológicas	Velocidad de viento (m/s)	1.75
	Dirección de viento (°)	180
	Rugosidad de sitio (m)	0.4
	Temperatura ambiente (°C)	20.8 - 34.8
	Humedad relativa a 2m (%)	12 - 36
Vegetación	Tipo	Arbórea

Casos de experimentación: Los casos de experimentación están determinados por las posibles combinaciones de cada una de las variables y sus valores máximo, mínimos y medios, los cuales se definieron anteriormente en el diseño factorial de múltiples niveles (81 casos); en cuanto a las variables ambientales se trabajará con los valores del día representativo ya seleccionado. El procesamiento de la simulación de cada uno de los escenarios de experimentación se llevó a cabo en una Workstation Z440 con procesador Xeon, 32gb de RAM con el software de ENVI\_met Ver.4.40 Student. Para cada escenario se tomó en promedio 24hrs de simulación, por lo tanto, una sola corrida de simulación para cada escenario tomo 2.7 meses de tiempo de procesamiento, esto debido a que la versión para estudiantes no permitía el uso de procesamiento paralelo.

### 3.2.6. Conformación de la base de datos

De la simulación se obtuvo un archivo de monitoreo (.txt) de cada uno de los receptores utilizados, los cuales reportaban los datos de temperatura de aire, humedad relativa, velocidad de viento, dirección del viento, temperatura media radiante, radiación solar, entre otros elementos del clima a las alturas de 0.10, 0.30m 0.50, 0.70, 0.90, 1.50, 2.50, 3.50, 4.50, ....50.50m con un intervalo de tiempo 10min. Esta cantidad de información por receptor de un solo caso de experimentación sumaba más de 5000 filas en



un tabulador; por lo tanto, se consideraron ciertas especificaciones para seleccionar la información más útil para los objetivos de la investigación.

### 3.3. Modelación

Para obtener el modelo de mitigación de temperatura de aire por vegetación arbórea se siguió la metodología de análisis de datos de ciencia de datos, siendo el primer paso “Definición del problema” y segundo “Recolección de datos” los cuales ya se abarcaron gracias a que el método científico tiene similitudes, el tercer paso es la “Preparación de datos” donde se identifican y corrigen error o inconsistencias en los datos, se realizan transformación, integraciones y se simplifica de acuerdo a las necesidades de la investigación. Como cuarto paso esta la “Exploración de datos” donde se realiza un análisis descriptivo de los datos, medias, desviación estándar para caracterizar los datos, además se crean visualización de los datos para identificar patrones o tendencias. El quinto paso es el “Análisis estadístico” donde se realiza inferencia y modelado estadístico para entender las relaciones entre variables y finalmente el sexto paso que es el “Modelado predictivo” donde se selección los modelos y se ajustan según la naturaleza del problema y finalmente se validan a través de diferentes métricas.

#### 3.3.1. Preparación de datos

Este apartado es un paso importante en el proceso de análisis de datos y modelado predictivo. Implica, dependiendo de las necesidades de la investigación, limpiar, transformar, organizar los datos de tal forma que estén preparados para ser analizados. En este caso la necesidad de limpiar y transformar no estuvo presentes, pero lo que si fue necesario fue una reducción de dimensionalidad, donde se tuvo que seleccionar y conservar las características más relevantes para el análisis, debido a que la cantidad de información era demasiado grande, de tal manera que se eliminó aquella información que no aportaba información pertinente para los objetivos. Para lograrlo se realizaron diversos criterios de selección de datos para sintetizar la información.

Tabla 15. Primer criterio de selección de datos

Tiempo	Descripción	Altura	Descripción
8:00 – 20:00hrs	Se selecciono los datos obtenidos con intervalos de 60min, en horas cerradas (ejemplo: 8:00, 9:00, 10:00)	0.10 – 3.50m	Se selecciono los datos obtenidos hasta una altura máxima de 3.50m (ejemplo: 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90m)

Este primer criterio (Tabla 15) de selección logro una reducción significativa de la información a trabajar, logrando que cada receptor nos aportara un total de 106 filas de información. Como segundo criterio de selección de datos (Tabla 16), se buscó identificar la hora donde se presentaba la mayor mitigación de temperatura, para esto se comparó las temperaturas de aire de cada uno de los casos con el caso base y se obtuvieron las diferencias entre ellas; estas diferencias se consideraron como la mitigación de temperatura de aire que ocasionaba el elemento arbóreo. Se determino que, en promedio, la mayor cantidad de mitigación de temperatura en las diferentes alturas se presentaron a las 13:00hrs.

Tabla 16. Segundo criterio de selección de datos

Tiempo	Descripción
13:00hrs	Hora a la que se presenta la mayor cantidad promedio de mitigación de temperatura.

El segundo criterio de selección de datos logro una reducción de datos de 8,692 filas a 656filas, obteniendo una cantidad de 8 filas de información por receptor. El tercer criterio de selección de datos (Tabla 17) es identificar el receptor donde se reportaba la mayor mitigación promedio de temperatura de aire, esto se logró obteniendo un promedio de la diferencia de temperatura de aire entre el caso baso y cada uno de los casos, para todos los receptores. Se determino, basado en lo anterior, que el receptor N3 (ubicación norte a 3 m de distancia de la base del elemento arbóreo) es el receptor que monitorea el área donde es mayor la mitigación de temperatura de aire.

Tabla 17. Tercer criterio de selección de datos

Receptor	Descripción
N3	Receptor que monitorea el área donde es mayor la mitigación de temperatura de aire.

Finalmente, se trabajó con la información del receptor N3, a las 13 h; pero hubo un cambio más, en la altura solo se consideró de 0.10 a 1.50m esto basados en que solo se tomaría en cuenta la mitigación de temperatura que se encontraba en el área habitable, ósea que un ser humano puede llegar a percibir, esto considerando una altura promedio mexicana de 1.64 m.

Al terminar la selección de los datos más pertinentes para la investigación, se logró sintetizar en una base de datos muy sencilla, conformada por 81 filas (1 por cada caso) y 6 columnas, mostrando las características de los elementos arbóreos y su mitigación de temperatura de aire, véase Tabla 18.

Tabla 18. Fragmento de base de datos

# Caso	Altura Total (m)	Diámetro(m)	IAF ( $m^2m^2$ )	Altura tronco(m)	Mitigación( m)
1	5.0	3.0	1.0	2.0	0.05
2	5.0	3.0	1.1	3.0	0.05
3	5.0	3.0	1.0	4.0	0.02

### 3.3.3. Exploración de datos

#### 3.3.3.1. Análisis descriptivo

Para poder obtener la estadística descriptiva necesaria para tener un entendimiento general de los datos obtenidos, se utilizó el programa informático Minitab 21 y se procedió de la siguiente manera:

Se inicio el programa y se alimentó con la base de datos obtenida, después se procedió a elegir “Estadísticas” > Estadísticas básicas > Mostrar estadísticos descriptivos, en esta ventana se eligieron en la ventana de Variables, Altura total, Diámetro, IAF, Altura de tronco y Mitigación, después se procedió a seleccionar el botón de Graficas y seleccionando Histograma de datos, Graficas de valores individuales y Grafica de caja de datos y Aceptar; una vez de nuevo en la ventana de mostrar estadísticos descriptivos, seleccionamos Estadísticos y seleccionamos Media, EE de la media, Desviación estándar, Varianza, Mínimo, máximo, Mediana, Primer cuartil, Tercer cuartil, Asimetría, Curtosis y predeterminadas y aceptar, para finalizar en la ventana de Mostrar estadísticos descriptivos damos Aceptar.

#### 3.3.3. Análisis estadístico

##### 3.3.3.2. Análisis factorial

Para poder determinar en qué grado la altura total, el diámetro, el IAF y la altura del tronco afecta la mitigación de temperatura de aire de un elemento arbóreo en las condiciones climatológicas del día representativo de verano de Chihuahua se utilizó un análisis factorial. Para obtener este análisis en el programa informático MiniTab se procedió de la siguiente manera: Se eligió Estadísticas > DOE > Factorial > Analizar diseño factorial, dentro de esta ventana se selecciona Respuestas, y se ingresó Mitigación, después se seleccionó Términos, ahí en Incluir términos en el modelo hasta el orden, se eligió 3, y Aceptar. Después se selección el menú Graficas, en Graficas de residuos se seleccionó Cuatro en uno y Aceptar.





### ***3.3.2. Modelado predictivo***

Para ajustar un modelo con los predictores y eliminar los predictores que no tienen una relación estadísticamente significativa con la respuesta se realizó un análisis de regresión múltiple. Para obtenerlo a través del programa informático Minitab se siguió el siguiente procedimiento: Se eligió Estadísticas > Regresión > Regresión > Regresión > Ajustar modelo de regresión, dentro de esta ventana en Respuestas se ingresó Mitigación, en Predictores continuos se ingresó altura total, el diámetro, el IAF y la altura del tronco; después se seleccionó Graficas, en Graficas de residuo se seleccionó Cuatro en uno, en Residuos vs. Las variables se ingresaron altura total, el diámetro, el IAF y la altura del tronco. Después se dio Aceptar al cuadro de dialogo.

## Capítulo 4: Resultados

En este capítulo se expone un análisis detallado de los hallazgos obtenidos a lo largo de este estudio. Inicialmente, se presentan las tablas de valores del Índice de Área Foliar (IAF), proporcionando la información del rango de IAF presente en la ciudad de Chihuahua. A continuación, se incluyen las tablas que muestran la mitigación de la temperatura bajo diferentes escenarios, permitiendo una comparación comprensiva entre diversos valores de las variables independientes y sus impactos. Finalmente, se discuten los modelos matemáticos desarrollados, los cuales han sido fundamentales para prever y entender los comportamientos y efectos de las variables estudiadas.

### 4.1 Experimentación

Como resultado del estudio en campo del rango de IAF presente para la Cd. De Chihuahua se realizó una base de datos donde se diversos IAF calculados con diferentes modelos (véase Apéndice B), de los cuales se obtuvo un promedio para cada muestra y finalmente se obtuvo el mínimo, máximo y media del rango de IAF (Tabla 19). Esta información fue utilizada para la simulación de escenarios para el cálculo de mitigación de temperatura, determinando que el valor de IAF a usar son 1.00 min, 6.00 máx. y 3.5 medio.

Tabla 19. Valores mínimos, promedio y máximos de IAF por diferentes modelos de calculo

Valores	Miller (1967)	LiCor LAI2000	Lang (1987)	G. & al. (2018)	N. & C. (1989)	T. & al. (2010)	Promedio
Min	1.27	1.09	1.27	0.89	0.98	1.00	<b>1.13</b>
Pro	3.36	2.95	3.37	2.65	2.75	2.67	<b>2.96</b>
Max	6.54	5.64	6.61	5.13	5.26	5.22	<b>5.67</b>

De la simulación de los 81 escenarios, después de pasar por un proceso de limpieza y selección de datos se obtuvo la siguiente base de datos, con la cual se trabajó el modelado matemático para encontrar la relación entre variables. La Tabla 20 presenta el conjunto de datos que muestran la relaciona entre las variables físicas de la vegetación arbórea y la mitigación de temperatura de aire; los valores de mitigación máxima de temperatura es de 2.00°C encontrado en la fila 26 para un árbol con altura de 5.00m, diámetro 9.00m, IAF de 6.00 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y una altura de tronco de 3.00m, otros valores altos se encuentran en fila 25 y 27, con 1.65 y 1.97°C, todos los escenarios mencionados tenían el diámetro máximo y el IAF máximo, altura del árbol mínima y cada uno, una altura de tronco diferente. Los valores de mitigación mínimos se presentaron en la fila 55, 56 y 57, con una altura de árbol de 25.00m, diámetro 3.00m (mínimo), 1.00 IAF (mínimo) y cada uno con diferente altura de tronco, presentado mitigación de -0.06, -0.08 y -0.09°C.



Tabla 20. Base de datos de mitigación de temperatura de aire

#	H (m)	D (m)	IAF (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	T (m)	M (°C)	#	H (m)	D (m)	IAF (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	T (m)	M (°C)
1	5	3	1.0	2	0.05	42	15	5	3.5	4	0.56
2	5	3	1.0	3	0.05	43	15	5	6.0	2	1.00
3	5	3	1.0	4	0.02	44	15	5	6.0	3	0.88
4	5	3	3.5	2	0.32	45	15	5	6.0	4	0.82
5	5	3	3.5	3	0.27	46	15	9	1.0	2	0.43
6	5	3	3.5	4	0.24	47	15	9	1.0	3	0.38
7	5	3	6.0	2	0.26	48	15	9	1.0	4	0.43
8	5	3	6.0	3	0.44	49	15	9	3.5	2	1.32
9	5	3	6.0	4	0.39	50	15	9	3.5	3	1.28
10	5	5	1.0	2	0.24	51	15	9	3.5	4	1.21
11	5	5	1.0	3	0.25	52	15	9	6.0	2	1.75
12	5	5	1.0	4	0.22	53	15	9	6.0	3	1.66
13	5	5	3.5	2	0.49	54	15	9	6.0	4	1.58
14	5	5	3.5	3	0.69	55	25	3	1.0	2	-0.06
15	5	5	3.5	4	0.62	56	25	3	1.0	3	-0.08
16	5	5	6.0	2	0.73	57	25	3	1.0	4	-0.09
17	5	5	6.0	3	1.02	58	25	3	3.5	2	0.06
18	5	5	6.0	4	0.93	59	25	3	3.5	3	0.04
19	5	9	1.0	2	0.46	60	25	3	3.5	4	0.03
20	5	9	1.0	3	0.62	61	25	3	6.0	2	0.23
21	5	9	1.0	4	0.58	62	25	3	6.0	3	0.22
22	5	9	3.5	2	1.14	63	25	3	6.0	4	0.17
23	5	9	3.5	3	1.38	64	25	5	1.0	2	0.06
24	5	9	3.5	4	1.36	65	25	5	1.0	3	0.03
25	5	9	6.0	2	1.65	66	25	5	1.0	4	0.01
26	5	9	6.0	3	2.00	67	25	5	3.5	2	0.37
27	5	9	6.0	4	1.97	68	25	5	3.5	3	0.36
28	15	3	1.0	2	-0.01	69	25	5	3.5	4	0.16
29	15	3	1.0	3	-0.03	70	25	5	6.0	2	0.68
30	15	3	1.0	4	-0.05	71	25	5	6.0	3	0.63
31	15	3	3.5	2	0.24	72	25	5	6.0	4	0.55
32	15	3	3.5	3	0.18	73	25	9	1.0	2	0.35
33	15	3	3.5	4	0.18	74	25	9	1.0	3	0.32
34	15	3	6.0	2	0.40	75	25	9	1.0	4	0.33
35	15	3	6.0	3	0.38	76	25	9	3.5	2	1.15
36	15	3	6.0	4	0.31	77	25	9	3.5	3	1.11
37	15	5	1.0	2	0.16	78	25	9	3.5	4	1.08
38	15	5	1.0	3	0.11	79	25	9	6.0	2	1.59
39	15	5	1.0	4	0.07	80	25	9	6.0	3	1.52
40	15	5	3.5	2	0.71	81	25	9	6.0	4	1.46
41	15	5	3.5	3	0.62						



## 4.2 Modelado matemático

### 4.2.1. Estadística descriptiva

El análisis estadístico descriptivo (Tabla 21) de los datos utilizados obtenidos para el desarrollo del modelo matemático es útil para resumir sus características generales. La variable dependiente “mitigación de temperatura de aire” (M) tiene una media de 0.5832, con una dispersión significativa en sus valores, como se refleja en la desviación estándar y la varianza.

Tabla 21. Análisis descriptivo

Var.	N	N*	Media	EEM	Desv. Est.	Varianza	Min	Q1	Media na	Q3	Max	Así.	Cur.
H	81	0	15.0000	0.913	8.216	67.50	5.00	5.000	15.00	25.00	25.0	0.00	-1.52
D	81	0	5.6670	0.279	2.510	6.300	3.00	3.000	5.000	9.000	9.0	0.39	-1.52
IAF	81	0	3.5000	0.228	2.054	4.219	1.00	1.000	3.500	6.000	6.0	0.00	-1.52
T	81	0	3.0000	0.091	0.821	0.676	2.00	2.000	3.000	4.000	4.0	0.00	-1.52
M	81	0	0.5832	0.060	0.546	0.299	-0.09	0.175	0.390	0.965	2.0	0.92	-0.15

La curtosis sugiere que la distribución puede ser ligeramente achatada en comparación con una distribución normal, y la asimetría indica que la distribución es asimétrica con una cola derecha más larga (Figura 16). Esta información proporciona una idea de cómo se distribuyen y varían los valores de la variable M

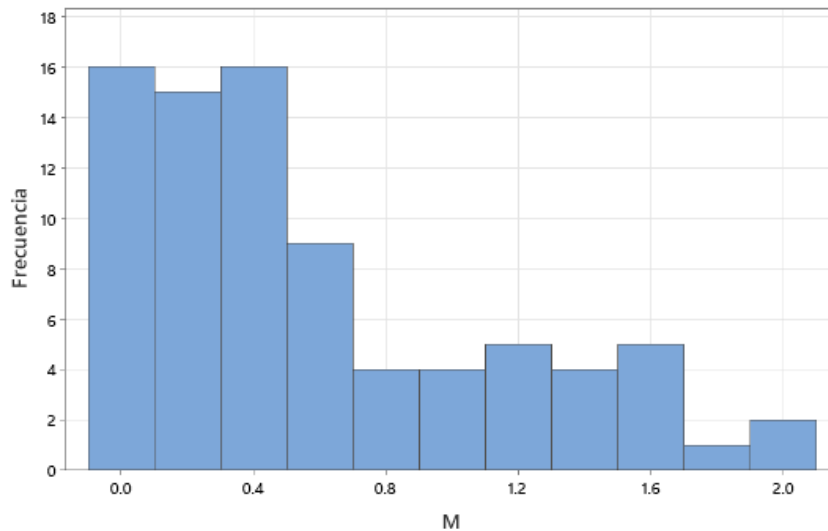


Figura 16. Histograma de Mitigación de temperatura (M)

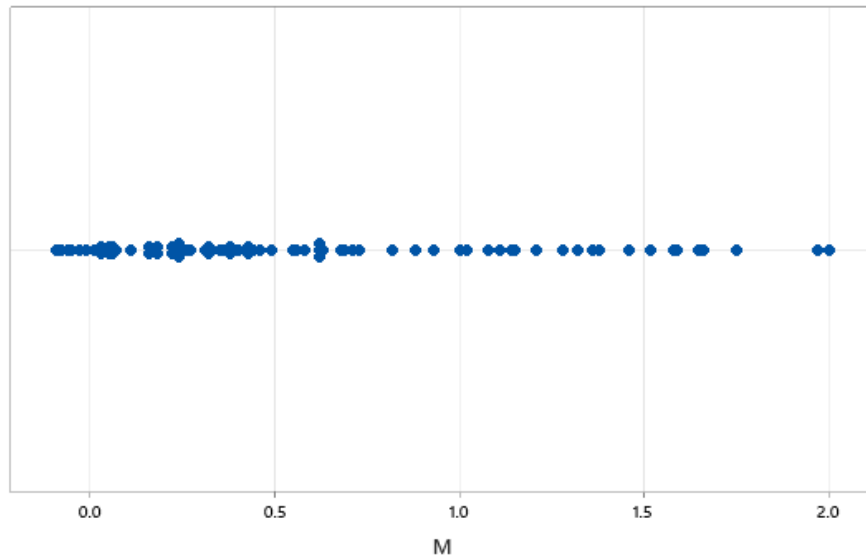


Figura 17. Grafica de valores individuales de M

#### 4.2.2. Análisis factorial

Se presentan los resultados claves del análisis factorial, identificando las principales dimensiones subyacentes en los datos. Se destacan los factores mas influyentes, su interpretación para algunos, proporcionando una comprensión clara de las estructuras existentes.

El término “H” tiene valor negativo del coeficiente (-0.1284) sugiere que un aumento en la variable "H" se asocia con una disminución en la variable dependiente o en el resultado que estás analizando. La magnitud del coeficiente (-0.1284) indica que el efecto de "H" en la variable dependiente es relativamente pequeño en términos absolutos. Su valor “p” de 0.000 (o  $p < 0.001$ ) es el valor más bajo posible y sugiere que la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es esencialmente inexistente; un valor “p” tan bajo es un indicador de alta confiabilidad en la evidencia encontrada en el estudio. Indica que las diferencias observadas son altamente improbables de ser atribuidas al azar y sugiere que hay una base sólida para afirmar la existencia de un efecto o diferencia significativa.

El término “D” muestra un valor positivo del coeficiente (0.5320) sugiere que un aumento en la variable "D" se asocia con un aumento en la variable dependiente o en el resultado que estás analizando. La magnitud del coeficiente (0.5320) indica que el efecto de "D" en la variable dependiente es relativamente grande en términos absolutos. Su valor “p” de 0.000 (o  $p < 0.001$ ) es el valor más bajo posible y sugiere que la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es esencialmente inexistente; un valor “p” tan bajo es un indicador de alta confiabilidad en la evidencia encontrada en el estudio. Indica que las diferencias observadas son altamente improbables de ser atribuidas al azar



y sugiere que hay una base sólida para afirmar la existencia de un efecto o diferencia significativa.

Tabla 22. Análisis factorial, eliminación de términos hacia atrás.

	Paso 1		Paso 2	
	Coefficiente	P	Coefficiente	P
Constante	0.58321	0.000	0.58321	0.000
H	-0.1284	0.000	-0.1284	0.000
D	0.5320	0.000	0.5320	0.000
L	-0.40358	0.000	-0.40358	0.000
T	-0.02247	0.000	-0.02247	0.000
H*D	0.03691	0.000	0.03691	0.000
H*L	0.04543	0.000	0.04543	0.000
H*T	-0.08864	0.000	-0.08864	0.000
D*L	-0.2783	0.000	-0.2783	0.000
D*T	-0.02272	0.014	-0.02272	0.008
L*T	-0.01790	0.065	-0.01790	0.047
H*D*L	0.05049	0.001	0.05049	0.000
H*D*T	0.06049	0.001	0.06049	0.000
H*L*T	-0.06173	0.001	-0.06173	0.000
D*L*T	-0.02062	0.535		
S		0.0301897		0.0297157
R-cuad.		99.94%		99.91%
R-cuad. Ajust.		99.70%		99.70%
R-cuad. Pred.		98.44%		98.99%
Cp de Mallows		65.00		56.25
AICc		295.17		-11.17
BIC		-178.51		-183.39

Términos candidatos: H; D; L; T; H\*D; H\*L; H\*T; D\*L; D\*T; L\*T; H\*D\*L; H\*D\*T; H\*L\*T; D\*L\*T

El valor negativo del coeficiente (-0.40358) del término "L" sugiere que un aumento en la variable "L" se asocia con una disminución en la variable dependiente o en el resultado que estás analizando. La magnitud del coeficiente (-0.40358) indica que el efecto de "L" en la variable dependiente es relativamente grande en términos absolutos y más fuerte que el efecto de "H". Su valor "p" de 0.000 (o  $p < 0.001$ ) es el valor más bajo posible y sugiere que la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es esencialmente inexistente; un valor "p" tan bajo es un indicador de alta confiabilidad en la evidencia encontrada en el estudio. Indica que las diferencias observadas son altamente improbables de ser atribuidas al azar y sugiere que hay una base sólida para afirmar la existencia de un efecto o diferencia significativa.



El valor negativo del coeficiente (-0.02247) del término "T" sugiere que un aumento en la variable "T" se asocia con una disminución en la variable dependiente o en el resultado que estás analizando. La magnitud del coeficiente (-0.02247) indica que el efecto de "T" en la variable dependiente es relativamente pequeño en términos absolutos. Su valor "p" de 0.000 (o  $p < 0.001$ ) es el valor más bajo posible y sugiere que la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es esencialmente inexistente; un valor "p" tan bajo es un indicador de alta confiabilidad en la evidencia encontrada en el estudio. Indica que las diferencias observadas son altamente improbables de ser atribuidas al azar y sugiere que hay una base sólida para afirmar la existencia de un efecto o diferencia significativa.

El término "DL" tiene un coeficiente negativo (-0.2783) indica que cuando las variables "D" y "L" aumentan juntas, la variable dependiente tiende a disminuir. Esto sugiere una relación negativa entre "D" y "L" en relación con la variable dependiente. Su valor "p" de 0.000 (o  $p < 0.001$ ) es el valor más bajo posible y sugiere que la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es esencialmente inexistente; un valor "p" tan bajo es un indicador de alta confiabilidad en la evidencia encontrada en el estudio. Indica que las diferencias observadas son altamente improbables de ser atribuidas al azar y sugiere que hay una base sólida para afirmar la existencia de un efecto o diferencia significativa. El término "LT" muestra un coeficiente negativo (-0.01790) indica que cuando las variables "L" y "T" aumentan juntas, la variable dependiente tiende a disminuir, aunque la magnitud del coeficiente es pequeña. Esto sugiere una relación negativa entre "L" y "T" en relación con la variable dependiente. Su valor "p" de 0.065 es un poco mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado de 0.05 o 5%. Esto sugiere que, aunque la probabilidad de obtener los resultados observados debido al azar es relativamente baja, aún no se alcanza el umbral de significancia tradicional.

Finalmente, el término "DLT" tiene un coeficiente negativo (-0.02062) indica que cuando las variables "D," "L" y "T" aumentan juntas, la variable dependiente tiende a disminuir, aunque la magnitud del coeficiente es pequeña. Esto sugiere una relación negativa entre "D," "L" y "T" en relación con la variable dependiente. Su valor "p" de 0.535 es relativamente alto. Esto significa que hay una alta probabilidad de que los resultados observados se deban al azar o a la variabilidad inherente de los datos en lugar de una diferencia real o efecto significativo. En otras palabras, los resultados del término no son estadísticamente significativos. En cuanto a índices como el error cuadrático medio (RMSE)(s) tiene un valor de 0.031897 sugiere el modelo tiene un buen ajuste a los datos; los diferentes coeficientes de determinación (R-cuad 99.94%, R-cuad. Ajustada 99.70% y R-cuad. de predicciones 98.44%) sugieren cada uno que el modelo es adecuado, se ajusta fuertemente a los datos, es robusto incluso teniendo en cuenta la complejidad del modelo y tiene una buena capacidad de predicción y respecto a los criterios de  $C_p$  de Mallows, AICs, y BIC que nos permiten determinar si el modelo está equilibrado entre ajuste y complejidad, se muestran valores que indican que ningún modelo de ellos considera un buen equilibrio entre ajuste y complejidad y, por lo tanto, se sugiere que el modelo necesita simplificarse o que otros modelos podrían ser más adecuados para el conjunto de datos.



Tabla 23. Factores, niveles y valores

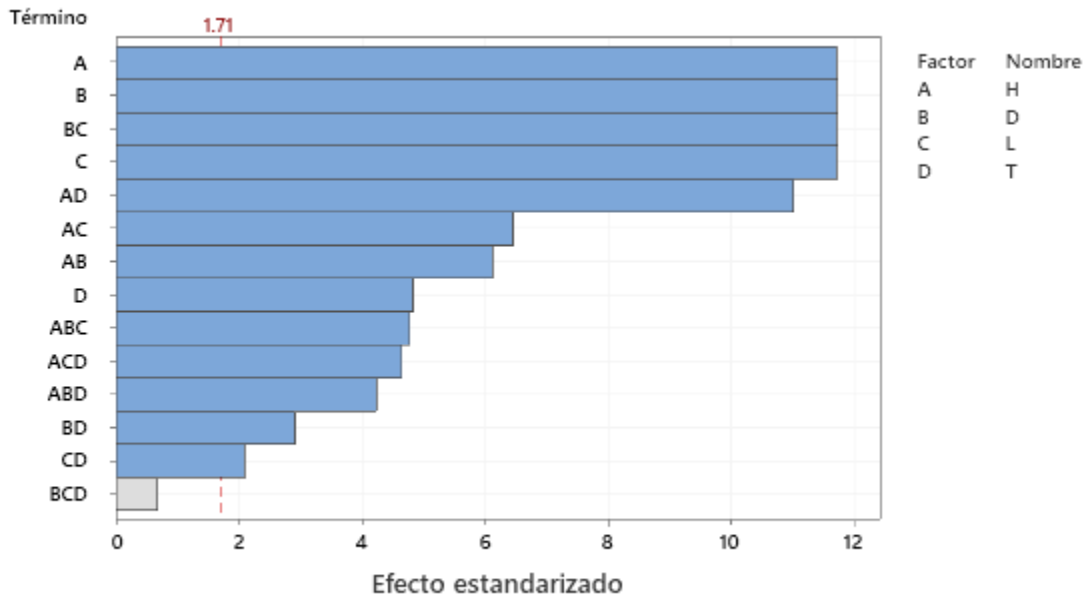
Factor	Niveles	Valores
H	3	5; 15; 25
D	3	3; 5; 9
L	3	1; 3.5; 6
T	3	2; 3; 4

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 24), donde comparamos las medidas de varios grupos para determinar si las diferencias entre ellos son estadísticamente significativas, se identificó que la suma de cuadrados ajustado para el término “D”, “L” y “D\*L” se mostraban más cercanos a la suma de cuadrados total, estos indica que su aportación a la variabilidad en la variable dependiente “M” es mayor que en todos los demás términos; además al comparar los valores F obtenidos con los Valores F críticos para determinar su significancia, se encontró que solo los valores de “H”, “D”, “L” y “D\*L” eran mayores que los Valores críticos F, por lo tanto solo estos términos son considerados significativos. Este último resultado se puede visualizar más fácilmente en el diagrama de Pareto (Figura 18) que nos permite priorizar y visualizar las causas ms importantes en el conjunto de datos, cabe mencionar que en este diagrama también se encuentra que el término “H\*T” también es significativo, lo cual no coincide con el análisis de varianza.

Tabla 24. Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor F Crit.	Valor p
Modelo	56	23.9056	0.42689	483.44	252.04	0.000
Lineal	8	21.4506	2.68132	3036.52	238.88	0.000
H	2	0.7290	0.36450	412.78	199.50	0.000
D	2	12.8987	6.44937	7303.73	199.50	0.000
L	2	7.7966	3.89828	4414.69	199.50	0.000
T	2	0.0263	0.01313	14.87	199.50	0.000
Int.2 términos	24	2.3128	0.09637	109.13	249.05	0.000
H*D	4	0.0537	0.01343	15.21	224.58	0.000
H*L	4	0.0591	0.01478	16.74	224.58	0.000
H*T	4	0.1610	0.04026	45.59	224.58	0.000
D*L	4	2.0131	0.50328	569.95	224.58	0.000
D*T	4	0.0158	0.00395	4.48	224.58	0.008
L*T	4	0.0100	0.00250	2.83	224.58	0.047
Int.3 términos	24	0.1422	0.00592	6.71	249.05	0.000
H*D*L	8	0.0510	0.00637	7.22	238.88	0.000
H*D*T	8	0.0423	0.00529	5.99	238.88	0.000
H*L*T	8	0.0489	0.00611	6.92	238.88	0.000
Error	24	0.0212	0.00088			
Total	80	23.9268				





Una barra gris representa un término que no está en el modelo.

Figura 18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

#### 4.2.3. Componentes principales

En las gráficas de efectos principales (Figura 19), en el eje X se encuentran los valores de los términos, y en eje Y el valor de la variable dependiente “M”. Los términos “D” y “L”, de acuerdo con las gráficas, muestran un efecto significativo positivo, mostrándose líneas de mayor longitud e inclinación más pronunciada, lo cual se puede interpretar como un efecto más grande en comparación a líneas planas y cortas como lo muestran los términos “H” y “T”. Por lo tanto, se puede determinar que el aumento de “D” y/o “L” aumentara también el valor de “M”; el aumento en “H” disminuye el valor de “M” y con respecto al valor de “T”, que muestra una línea casi plana, podría determinarse que no hay efecto en “M” al modificar “T” o que se necesitan más datos para poder determinar algún efecto.

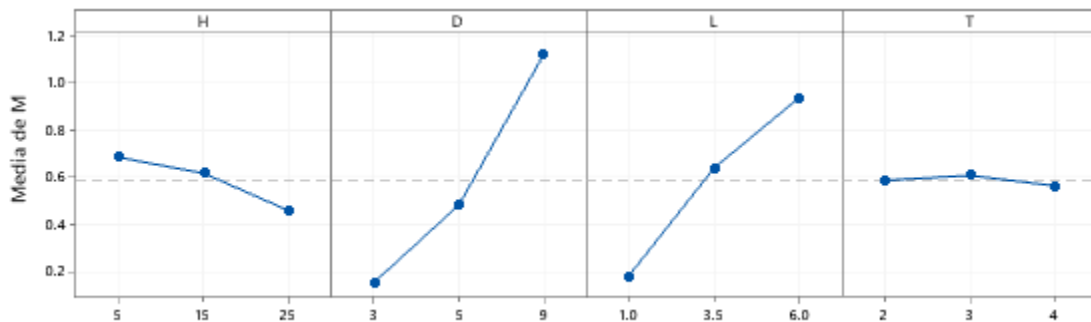


Figura 19. Grafica de efectos principales para M (medias ajustadas)



En las gráficas de interacción para “M” (Figura 20) se encontró que los términos “H\*D”, “H\*L” y “D\*L” presentaron interacciones aditivas, mostrando un efecto negativo en “H\*D” y “H\*L” y positivo en “D\*L”; esto va acorde a lo anteriormente visto en el análisis factorial, donde “H” presenta una relación negativa disminuyen “M” al aumentar “H. En cuanto a “D\*L” es claro que la suma de los dos términos más significativos muestren una interacción positiva, aumentando el valor de “M” al aumentar cada uno de sus valores. De manera contraria, “H\*T”, “D\*T” y “L\*T” muestran interacciones cruzadas, esto indica que el factor cambia según el nivel del otro factor, pero no por el momento no se pudo determinar si estas interacciones son positivas o negativas; la tendencia en “H\*T” es negativa con respecto a “M”, y “D\*T” y “L\*T” muestran tendencias positivas, estas últimas podrían deberse al alto grado de significancia del término “D” y “L”.

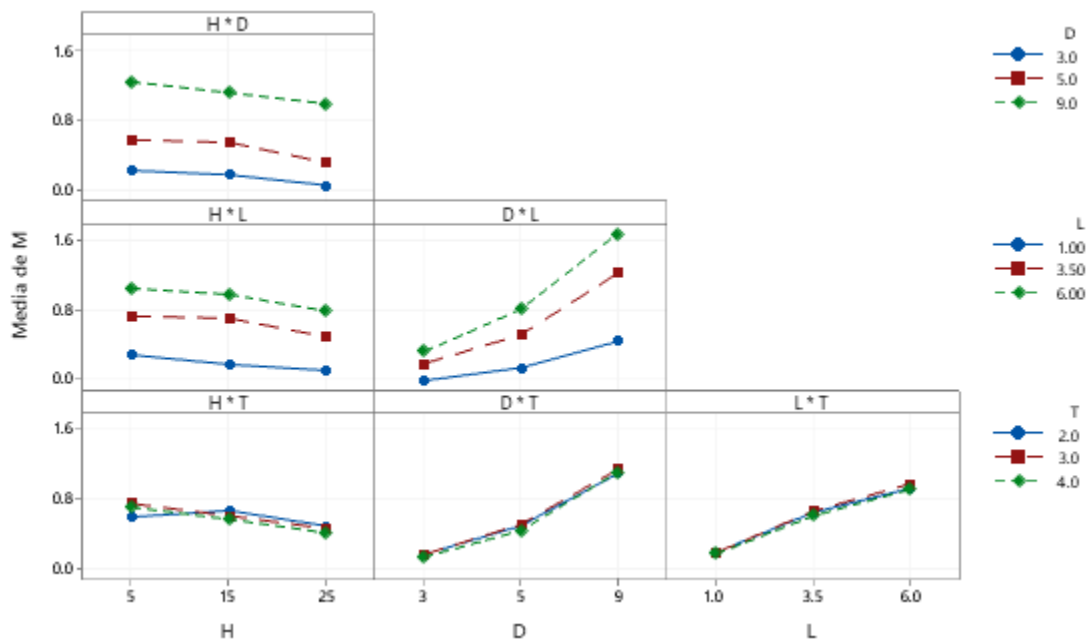


Figura 20. Grafica de interacción para M (Medias ajustadas)

#### 4.2.2. Regresión lineal múltiple

La primera regresión lineal realizada fue considerando las 4 variables independientes, los resultados mostraron que las dos principales variables que determinar el valor de la variable dependiente son “D” y “L”, tanto sus coeficientes, sus valores “T” y “P” son evidencia en contra de la hipótesis nula; en cambio los valores de “H” y “T” son muy bajos, tanto en sus coeficientes como en valor “T”, pero más importante aún el valor “P” de “T” supera el nivel de significancia predefinido de 0.05, lo cual sugiere que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo cual será retirada de la ecuación en el siguiente paso del Backward Stepwisser Regression (BSR). En el siguiente paso se

realizó el modelo de 3 variables independientes, donde las variables con mayor peso son “D” y “L” y una de menor peso “H”; y el último modelo fue realizado con solo las 2 variables de mayor peso.

Tabla 25. Resumen estadístico de modelos de mitigación de temperatura aplicando Eliminación hacia atrás

# Variables	Variables	R-Cuadrada	R-Cuadrada Adj	R-Cuadrada Pred
4	H, D, L, T	88.94%	88.36%	87.16%
3	H, D, L	88.91%	88.48%	87.48%
2	D, L	86.02%	85.66%	84.71%

La Tabla 25 presente los resultados de los tres modelos de regresión múltiple descritos anteriormente, en cuanto a capacidad explicativa (R-cuadrada) el modelo 4-variables es el más alto, esto sugiere que explica mejor la variabilidad de la variable dependiente, pero cabe mencionar que este indicador es muy susceptible a aumentar su valor al aumentar el número de variables independientes. En cuanto a eficiencia del modelo (R-cuadrada ajustada) el modelo 3-variables tiene el valor más alto, lo que indica que es el modelo más eficiente con el menor número de variables y en cuanto al poder predictivo (R-cuadrada predicha) el modelo 3-variables es la que presenta un valor mayor, sugiriendo que generalizar mejor los datos nuevos. Se concluye que el modelo 3-variables, dado su poder predictivo y eficiencia del modelo es preferible por tener un buen equilibrio entre precisión y simplicidad.

#### 4.2.2.1. Modelo 4-variables

Este modelo es llamado 4-variables (Ecuación 13), ya que se compone por las variables H (altura del árbol), D (diámetro del dosel), L (índice de área foliar) y T (altura del tronco). Siendo el modelo con mayor cantidad de variables, fue el que obtuvo una mejor R-cuadrada, y segundo lugar en R-cuadrada ajustada y R-cuadrada predicha. Dentro de los coeficientes obtenidos, se encontraron que D y L tenían altos valores y H y D bajos valores, y cabe mencionar que T, tenía un Valor p mayor a 0.05, lo cual se considera que no es estadísticamente significativo. Véase Tabla 26.

Tabla 26. Modelo de mitigación de temperatura de aire M vs H; D; L; T

Términos	Coefficientes	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.647	0.106	-6.12	0.000	
H	-0.01131	0.00254	-4.46	0.000	1.00
D	0.15997	0.00831	19.25	0.000	1.00
L	0.1509	0.0102	14.86	0.000	1.00
T	-0.0117	0.0254	-0.46	0.647	1.00



$$M = -0.647 - 0.01131 H + 0.15997 D + 0.1509 L - 0.0117 T \quad \text{Ec. [13]}$$

Tabla 27. Análisis de varianza de modelo 4-variables

Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor p
Regresión	4	21.2808	5.3202	152.81	0.000
H	1	0.6913	0.6913	19.86	0.000
D	1	12.8981	12.8919	370.48	0.000
L	1	7.6840	7.6840	220.71	0.000
T	1	0.0073	0.0073	0.21	0.647
Error	76	2.6459	0.0348		
Total	80	23.9268			

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 21) nos permite observar las variables con mayor impacto, tales como “D” diámetro, “L” índice de área foliar, y de menor manera, pero aun superando la línea de referencia, lo que indica que son estadísticamente significativos. Además, se muestra nuevamente que el valor “T” altura del tronco, no es estadísticamente significativo al mostrarse debajo de la línea de referencia, de tal manera que será eliminado por regla en la Eliminación hacia atrás (Backward Stepwisser Regression).

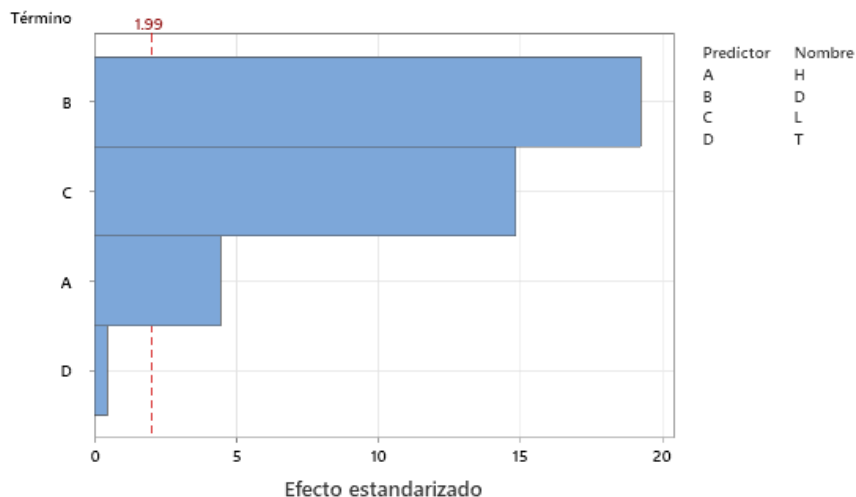


Figura 21. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 4-variables

En las gráficas de residuos para “M” se realizaron 4 representaciones, grafica de probabilidad normal, vs ajuste, histograma y vs orden. La grafica de probabilidad normal (Figura 22a) mostro que el modelo está funcionando de manera eficaz, ya que se puede observar que los residuos se distribuyen de manera normal y centrados en cero; eso

significa que la predicción del modelo es precisa y que no hay evidencia de claros indicios de sesgo. En la gráfica de residuos vs valores ajustados (Figura 22b) se puede observar que no hay un patrón claro o estructura, esto significa que los residuos son aleatorios y no están correlacionados con los valores ajustados, la distribución de los puntos se encuentra alrededor de 0 (por arriba y por debajo), esto sugiere que no hay sesgo sistemático en las predicciones y no se muestran valores atípicos. Hay una ligera tendencia de dispersión de residuos, que indica que aumentan conforme aumentan los valores ajustados, lo que puede ser indicación de una posible heterocedasticidad, no obstante, la tendencia no es muy fuerte.

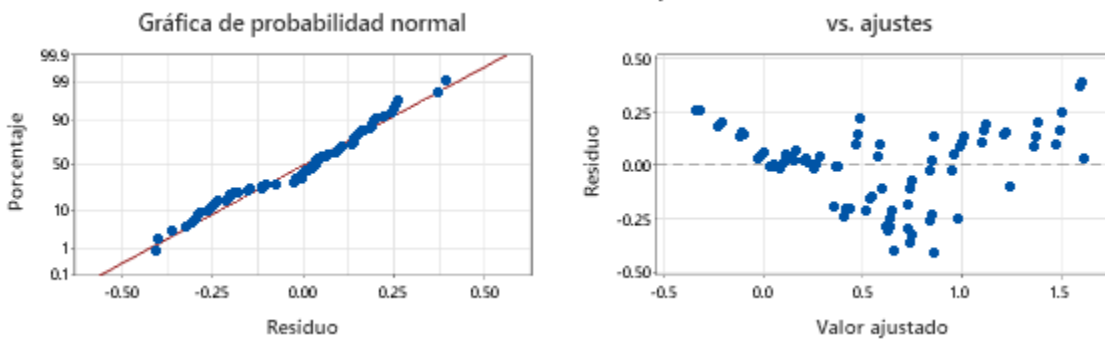


Figura 22. Gráficas de probabilidad normal y residuos vs ajustes de modelo 4-variables

El histograma (Figura 23a) muestra una forma de campana simétrica alrededor del cero, lo que supone una distribución normal de los residuos, la mayor frecuencia se encuentra cerca del cero, lo que indica que realiza predicciones precisas, no se presentan valores atípicos significativos; por lo que se puede concluir que el histograma indica que hay un buen ajuste y valida la normalidad de los residuos. La gráfica de residuos vs orden (Figura 23b), no parece mostrar algún patrón claro o tendencia sistemática, las fluctuaciones de los datos parecen ser aleatorias, los datos fluctúan alrededor de cero sin alejarse demasiado, esto indica que no hay observaciones atípicas y que no hay un sesgo sistemático en las predicciones. Podemos concluir que esta gráfica que los residuos son independientes y aleatorios, sin evidencia de autocorrelación o patrones significativos.

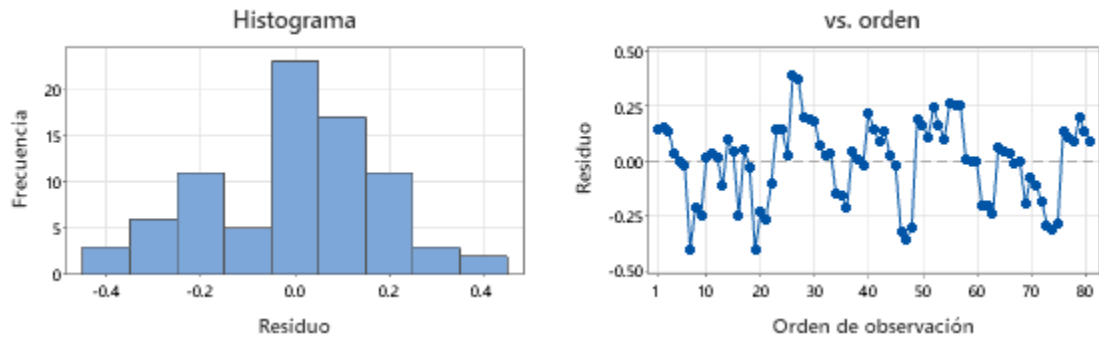


Figura 23. Histograma y gráfica de residuos vs orden de modelo 4-variables



#### 4.2.2.2. Modelo 3-variables

Este modelo es llamado 3-variables (Ecuación 14), ya que se compone por las variables H (altura del árbol), D (diámetro del dosel) y L (índice de área foliar). Siendo el modelo más equilibrado, fue el que obtuvo el segundo valor de R-cuadrada, y primer lugar en R-cuadrada ajustada y R-cuadrada predicha. Dentro de los coeficientes obtenidos, se encontraron que D y L tenían altos valores y H bajos valores. Véase Tabla 28.

Tabla 28. Modelo de mitigación de temperatura de aire M vs H; D; L

Términos	Coefficientes	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.6817	0.0729	-9.36	0.000	
H	-0.01131	0.00253	-4.48	0.000	1.00
D	0.15997	0.00827	19.35	0.000	1.00
L	0.1509	0.0101	14.93	0.000	1.00

$$M = -0.6817 - 0.01131 H + 0.15997 D + 0.1509 L \quad \text{Ec. [14]}$$

Tabla 29. Análisis de varianza de modelo 3-variables

Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor p
Regresión	3	21.2735	7.0912	205.79	0.000
H	1	0.6913	0.6913	20.06	0.000
D	1	12.8981	12.8919	374.31	0.000
L	1	7.6840	7.6840	223.00	0.000
Error	76	2.6533	0.0345		
Falta Ajuste	23	2.3278	0.1012	16.79	0.000
Error puro	54	0.3255	0.0060		
Total	80	23.9268			

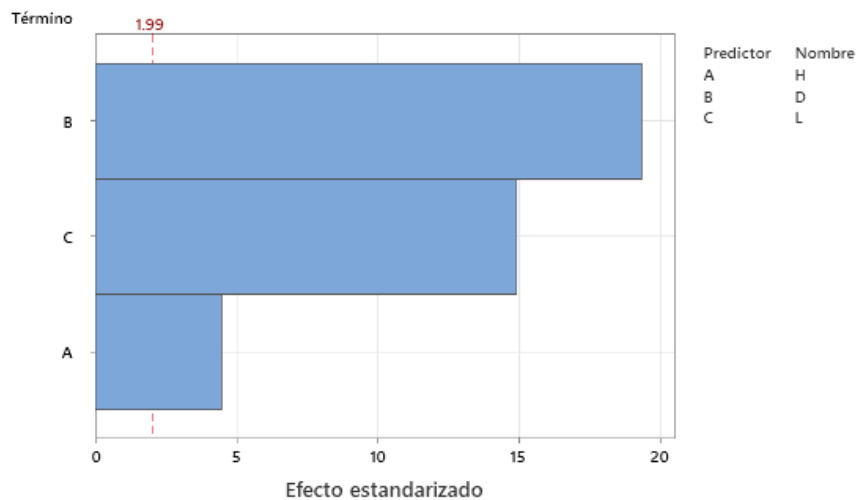


Figura 24. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 3-variables



El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 24) nos permite observar las variables con mayor impacto, tales como “D” diámetro, “L” índice de área foliar, y de menor manera, pero aun superando la línea de referencia, lo que indica que son estadísticamente significativos, de cualquier manera, por ser el menor será eliminado por regla en la Eliminación hacia atrás (Backward Stepwiser Regression).

En las gráficas de residuos para “M” se realizaron 4 representaciones, grafica de probabilidad normal, vs ajuste, histograma y vs orden (Figura 25). La grafica de probabilidad normal mostro que el modelo está funcionando de manera eficaz, ya que se puede observar que los residuos se distribuyen de manera normal y centrados en cero; eso significa que la predicción del modelo es precisa y que no hay evidencia de claros indicios de sesgo. En la gráfica de residuos vs valores ajustados se puede observar que no hay un patrón claro o estructura, esto significa que los residuos son aleatorios y no están correlacionados con los valores ajustados, la distribución de los puntos se encuentre alrededor de 0 (por arriba y por debajo), esto sugiere que no hay sesgo sistemático en las predicciones y no se muestra valores atípicos. Hay una ligera tendencia de dispersión de residuos, que indica que aumentan conforme aumentan los valores ajustados, lo que puede ser indicación de una posible heterocedasticidad, no obstante, la tendencia no es muy fuerte.

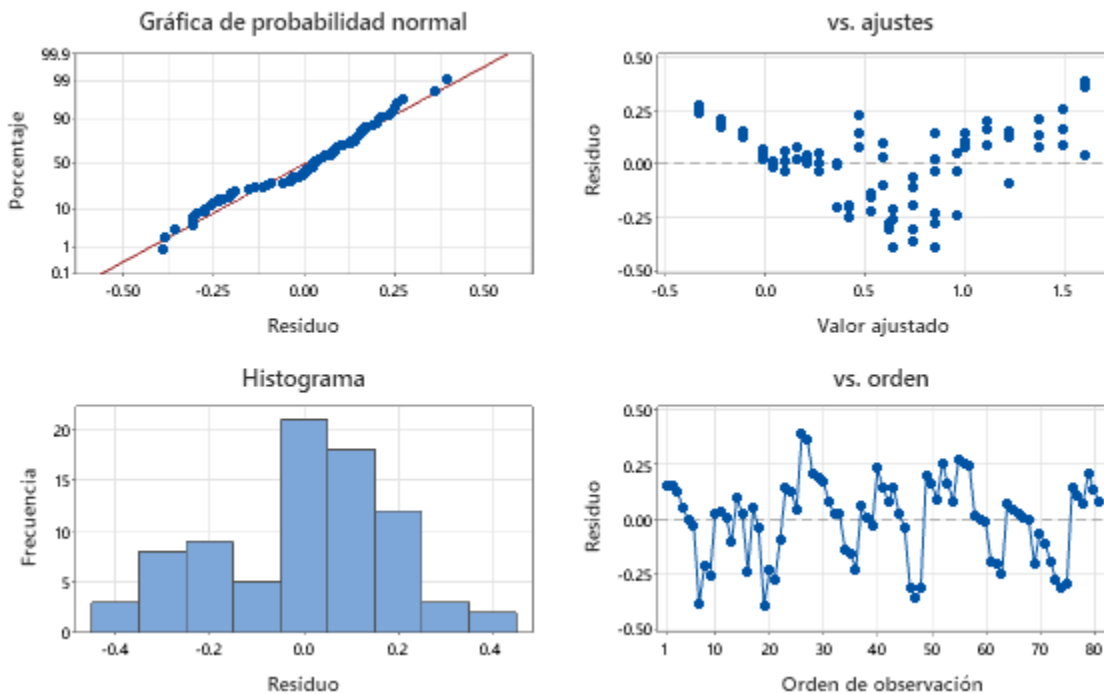


Figura 25. Graficas de residuos para M modelo 3-variables

El histograma muestra una forma de campana simétrica alrededor del cero, lo que supone una distribución normal de los residuos, la mayor frecuencia se encuentra cerca del cero, lo que indica que realiza predicciones precisas, no se presenten valores atípicos significativos; por lo que se puede concluir que el histograma indica que hay un buen ajuste y valida la normalidad de los residuos. La grafica de residuos vs orden, no parece mostrar algún patrón claro o tendencia sistemática, las fluctuaciones de los datos parecen ser aleatorias, los datos fluctúan alrededor de cero sin alejarse demasiado, esto indica que no hay observaciones atípicas y que no hay un sesgo sistemático en las predicciones. Podemos concluir que esta grafica que los residuos son independientes y aleatorios, sin evidencia de autocorrelación o patrones significativos.

#### 4.2.2.3. Modelo 2-variables

Este modelo es llamado 2-variables, ya que se compone por las variables D (diámetro del dosel) y L (índice de área foliar). Siendo el modelo más simplificado, no obtuvo el primer lugar en ninguno de los índices. Dentro de los coeficientes obtenidos, se encontraron que D y L tienen valores altos. Véase Tabla 30.

Tabla 30. Modelo de mitigación de temperatura de aire M vs D; L

Términos	Coeficientes	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-08514	0.0694	-12.27	0.000	
D	0.15997	0.00922	17.34	0.000	1.00
L	0.1509	0.0113	13.39	0.000	1.00

$$M = -0.8514 + 0.15997 D + 0.1509 L \quad \text{Ec. [15]}$$

Tabla 31. Análisis de varianza de modelo 2-variables

Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor p
Regresión	2	20.582	10.2911	240.00	0.000
D	1	12.898	12.8981	300.80	0.000
L	1	7.6840	7.6840	179.20	0.000
Error	78	3.345	0.0429		
Falta Ajuste	6	2.126	0.3544	20.94	0.000
Error puro	72	1.218	0.0169		
Total	80	23.927			



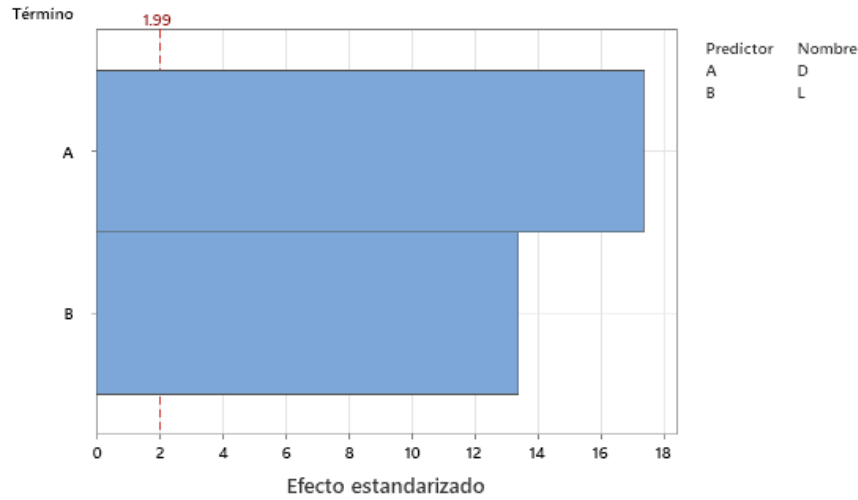


Figura 26. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo 2-variables

En las gráficas de residuos para “M” se realizaron 4 representaciones (Figura 27), gráfica de probabilidad normal, vs ajuste, histograma y vs orden. La grafica de probabilidad normal mostro que el modelo está funcionando de manera eficaz, ya que se puede observar que los residuos se distribuyen de manera normal y centrados en cero; eso significa que la predicción del modelo es precisa y que no hay evidencia de claros indicios de sesgo.

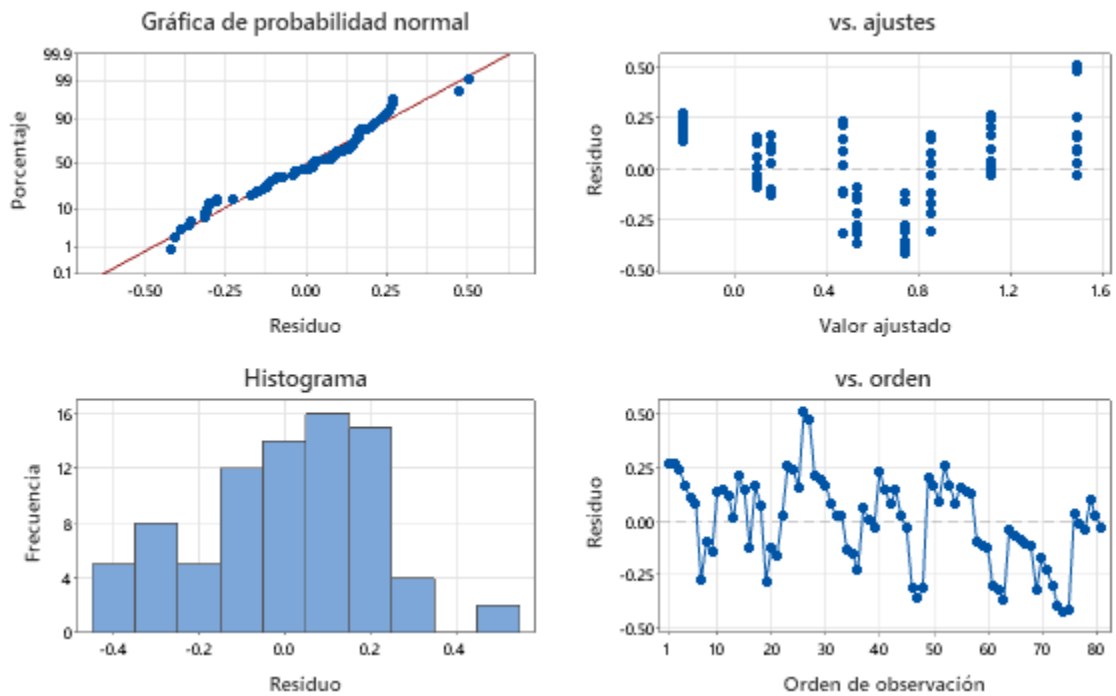


Figura 27. Graficas de residuos para M de modelo 2-variables

En la gráfica de residuos vs valores ajustados se puede observar que hay agrupamientos y que la dispersión parece ser mayor para los valores ajustados más altos, podría indicar una variabilidad no constante de los errores. El histograma muestra una forma de campana ligeramente simétrica alrededor del cero, lo que supone una distribución normal de los residuos, la mayor frecuencia se encuentra cerca del cero, lo que indica que realiza predicciones precisas, no se presenten valores atípicos significativos; por lo que se puede concluir que el histograma indica que hay un buen ajuste y valida la normalidad de los residuos. La gráfica de residuos vs orden, parece mostrar cierta estructura, con algunos patrones secuenciales, lo cual puede indicar que los residuos no son completamente aleatorios y posible presencia de autocorrelación.

## Capítulo 5: Discusión

En el marco de esta investigación, se han llevado a cabo análisis y experimentación en búsqueda de la comprobación de la hipótesis planteada, con los hallazgos obtenidos, se puede confirmar que la altura del árbol (H), diámetro del dosel (D) y el índice de área foliar (L) son características físicas que permiten estimar la mitigación máxima de temperatura de aire por vegetación arbórea en el ambiente térmico de la ciudad de Chihuahua, Chih. Más se encontró que la característica de altura de tronco (T) no muestra un aporte a la estimación de la mitigación; cabe mencionar que la característica de altura del árbol (H) no muestra un efecto significativamente alto, pero al momento de descartar la característica, como se muestra en el modelo 3, el modelo empieza a mostrar anomalías que nos sugieren que el modelo no es el más adecuado, por lo tanto, aunque su valor no es significativamente alto, parece que le da estabilidad al modelo, por lo cual se considera mantener la variable dentro del modelo predictivo.

Se encontró que la característica de la vegetación arbórea que más aporta a la mitigación de temperatura en el día representativo y a la hora de mayor calor (13:00) es el diámetro del dosel y el IAF, es podría relacionar con la capacidad de bloqueo de radiación solar y el aumento de evapotranspiración por la alta densidad de hojas, entre más densidad, mayor fuente de humedad, mayor bloqueo solar; y entre más diámetro de dosel, más área de bloqueo y de fuente de humedad. La altura total del árbol parece tener una relación negativa con la mitigación de temperatura, entre más alto sea el árbol, menor será su mitigación de temperatura, esto parece contradictorio, ya que el aumento de altura nos permite tener una cantidad mayor de hojas y debería aumentar el efecto de mitigación de temperatura; pero si considera que las hojas transpiran de acuerdo a su exposición a la radiación solar, podría ser que las hojas de los niveles más cercanos a la zona habitable, no estén tan expuestas y reduzca su transpiración, por lo tanto reducen su aporte de humedad al aire y de tal manera que la mitigación de temperatura se ve disminuida; además aunque tengamos una cantidad de hojas mayor, estas se encuentran a diferentes alturas, y por la acción del viento, el aumento de humedad puede verse transportado a lugares donde no fue monitoreado, esto puede implicar que la mitigación obtenida en este estudio está limitada sólo a un punto en específico (3m del tronco en dirección norte) y que la altura del árbol (H) puede tener una relación positiva si se estudiara los efectos globales de mitigación de temperatura. La altura del tronco mostró una relación negativa también, aunque esta fuese no significativa estadísticamente se considera que se necesitan más datos para poder determinar que no existe una relación en la mitigación de temperatura.

Otras investigación han confirmado lo anterior, como [Sanusi et al., \(2017\)](#), quien menciona que el índice área de planta (IAP), el cual al determina la intercepción de

radiación solar de un árbol individual, contando no solamente lo intercepción de las hojas, como lo hace el IAF, sino que también cuenta todos los elementos del árbol, como son ramas, frutos, entre otros elementos; menciona que el IAF es la característica que se debe tomar en cuenta para determinar la mitigación de temperatura de los árboles; Zhang et al., (2018) menciona que, de acuerdo con su experimentación con simulación, las principales características que promueven la mitigación son el diámetro y el IAF, más agrega otros elementos como el grado de transpiración y la distribución de los elementos arbóreos; Smithers et al., (2018) a través del uso de la ecuación de balance térmico determinó que el IAF es la característica más importante para la mitigación de temperatura de aire.

Otros estudios que confirman lo encontrado, son los de Krayenhoff et al., (2020), menciona que de acuerdo con su modelo BEP-Tree, el clima a nivel del peatón y el intercambio de energía a escala de vecindario, son más sensibles al IAF que a la altura total del árbol; y Y. Wang & Akbari, (2016) mencionan que el aumento del diámetro del dosel puede mitigar más la temperatura del aire que el aumento de la altura del árbol, ya que el aumento del diámetro aumenta el sombreado.

Se debe reconocer que, por el diseño del experimento, donde se decidió realizar la selección de los valores de las variables independientes de manera deliberada, y no de manera aleatoria, los resultados no pueden ser extrapolados y para que los resultados obtenidos del modelo matemático sean válidos, deben los valores de las variables independientes, estar dentro del rango de valores utilizados para generar el modelo. Esto no tiene una implicación negativa en el estudio, ya que estaba determinado desde un inicio que el modelo matemático sería específicamente para el área de la ciudad de Chihuahua, y los rangos de valores utilizados para generar el modelo fueron los presentes en esta zona.

Los anteriores hallazgos son pertinentes y tienen importantes implicaciones teóricas y prácticas en el campo de las ciencias urbanas; las implicaciones teóricas de la investigación están principalmente en su contribución al conocimiento de la ecología urbana, aportando información para la mejor comprensión del enfriamiento urbano por vegetación arbórea, y como se puede potenciar este efecto en beneficio del ser humano; en cuanto a las implicaciones prácticas, se verán reflejadas principalmente en el diseño y planificación urbana, con la información generada los diseñadores podrán tomar decisiones más cuantitativas con respecto a la selección de especies arbóreas para mejorar el confort térmico y combatir a la isla urbana de calor. Además, los resultados de la investigación pueden utilizarse para educar a los ciudadanos sobre la importancia de la vegetación arbórea en la regulación del clima urbano, fomentando una mayor conciencia y apoyo a la conservación de los árboles y espacios verdes de la ciudad.

Además, los resultados podrán contribuir al campo de estudio a través del avance en el conocimiento del fenómeno de enfriamiento evaporativo de la vegetación; se aporta nueva información para el fortalecimiento de la teoría del uso de áreas verdes como estrategia de mitigación de temperatura de aire en las ciudades; se podrán generar políticas y/o lineamientos de diseño para promover el uso eficiente de la vegetación; y finalmente se contribuye con información que puede ser relevante para combatir problemas de mayor escala como el cambio climático y la falta de conciencia de la población sobre la importancia de la vegetación. Algunas recomendaciones prácticas que se desprenden de los resultados y la contribución al campo de estudio:

1. **Selección de especies de árboles:** Optar por especies de árboles que tienden a tener un diámetro mayor y un índice de área foliar significativo. Estas especies pueden incluir robles, tilos, fresnos y otros árboles de hoja ancha.
2. **Diseño urbano con vegetación:** En la planificación y el diseño urbano, asegúrese de incorporar áreas verdes con árboles que cumplan con los criterios de diámetro e índice de área foliar para maximizar el enfriamiento urbano.
3. **Mantenimiento de la vegetación:** La poda y el cuidado adecuado de los árboles son esenciales para mantener su diámetro y densidad foliar, lo que asegurará un enfriamiento continuo en el tiempo.
4. **Políticas de conservación de árboles:** Fomente políticas locales y regulaciones que protejan y promuevan la conservación de los árboles en entornos urbanos.
5. **Educación:** Educar a la comunidad local sobre la importancia de los árboles en la reducción de la temperatura urbana y la mejora de la calidad del aire. Fomente la participación ciudadana en la plantación y cuidado de árboles.
6. **Monitoreo y medición:** Realice un seguimiento del diámetro y del índice de área foliar de los árboles en áreas urbanas para evaluar su efectividad en la reducción de la temperatura y hacer ajustes según sea necesario.
7. **Incentivos fiscales y programas de apoyo:** Ofrezca incentivos a propietarios de tierras y comunidades para plantar y mantener árboles que cumplan con los criterios necesarios para el enfriamiento urbano.
8. **Enfoque interdisciplinario:** Fomente la colaboración entre científicos, urbanistas, arquitectos y autoridades locales para diseñar estrategias y políticas que aprovechen al máximo los beneficios de la vegetación arbórea en la reducción del calor urbano.

Estas recomendaciones prácticas pueden ayudar a aplicar los hallazgos de la investigación en la planificación y el diseño de entornos urbanos más confortables y sostenibles, mejorando así la calidad de vida en las ciudades y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

## Capítulo 6: Conclusión

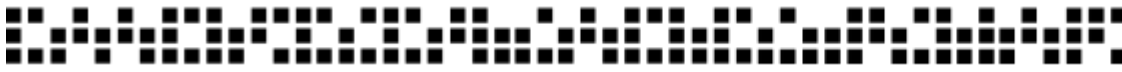
En resumen, esta investigación ha arrojado luz sobre la influencia crucial de tres variables específicas, la altura del árbol, el diámetro del árbol y su índice de área foliar, en el proceso de enfriamiento inducido por la vegetación arbórea en entornos urbanos. Los hallazgos han demostrado que, en términos de reducción de la temperatura del aire local y la mejora de las condiciones climáticas en áreas urbanas, estos tres factores son de vital importancia. Estos resultados no solo enriquecen la comprensión teórica de cómo la vegetación afecta el ambiente urbano, sino que también tienen importantes implicaciones prácticas. Los responsables de la planificación urbana y del diseño de espacios verdes pueden utilizar estos hallazgos para tomar decisiones informadas sobre la selección de especies arbóreas, su ubicación y su mantenimiento. La implementación de estas recomendaciones prácticas puede contribuir a la creación de entornos urbanos más frescos, sostenibles y habitables. Además, se subraya la importancia de considerar la vegetación arbórea como una herramienta eficaz en la mitigación de la isla urbana de calor. La plantación y el cuidado adecuado de árboles con los atributos adecuados pueden ser una estrategia valiosa para reducir el impacto del aumento de la temperatura del aire en entornos urbanos y, por extensión, contribuir a los esfuerzos globales de lucha contra el cambio climático. En última instancia, esta investigación destaca la necesidad de una colaboración interdisciplinaria y el diálogo entre científicos, urbanistas, autoridades locales y la comunidad en general para lograr un entorno urbano más sostenible y saludable. Los resultados proporcionan una base sólida para futuros estudios y para la implementación de políticas y prácticas que utilicen la vegetación arbórea como una herramienta efectiva en la creación de ciudades más frescas, resilientes y resistentes al cambio climático.

Al concluir la investigación, surgen un conjunto de preguntas adicionales que nos invitan a seguir explorando y ampliando el conocimiento en el ámbito del arbolado urbano. Estas interrogantes, emergen de los resultados y hallazgos obtenidos, abren nuevas vías de indagación y ofrecen oportunidades para futuras investigaciones. A continuación, destacamos algunas de estas preguntas:

1. ¿La altura total del árbol realmente tiene una relación negativa con el enfriamiento causado por la vegetación?
2. ¿El enfriamiento causado por la vegetación de diversos elementos arbóreos se sumarán?
3. ¿Cuál será el límite del IAF para colaborar a la mitigación de temperatura de aire? ya que sabemos que el aumento de humedad en el aire es limitado
4. Se investigó la mitigación máxima, la cual se encuentra en un determinado punto, ¿Cuál será la mitigación global de los escenarios simulados, y la relación con sus características físicas seguirán siendo las mismas?

## Referencias

- Abdel-Aziz, D. M., Shboul, A. Al, & Al-Kurdi, N. Y. (2015). Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption -The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate. *American Journal of Environmental Engineering*, 5(5), 131–140. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20150505.01>
- Acevedo, M. F. (2012). DATA ANALYSIS and STATISTICS for Geography, Environmental Science, and Engineering. In *Data Analysis and Statistics for Geography, Environmental Science, and Engineering*. <https://doi.org/10.1201/b13675>
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winnett, S. (1987). *A Guidebook On Tree Planting And Light - Colored Surfacing*.
- Alberti, M., & Marzluff, J. M. (2004). Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems*, 7(3), 241–265.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81, 742–754.
- Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Almenar, J., González, J. L., Garcia, C., & Peña, P. (1998). ¿Que es el análisis de Componentes principales? *Jano*, 1268, 58–60.
- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficies* (G. N. Editores (ed.); 1ª). LIMUSA, S.A. de C.V.
- ASHRAE. (2001). Psychrometrics. In R. American Society of Heating & A.-C. Enginners (Eds.), *ASHRAE handbook: 2001 Fundamentals* (pp. 1–17).
- Auliciems, A., & Szokolay, S. (1997). Thermal Comfort. Notes of passive and low energy architecture international. *PLEA 1997 University of Queensland*.
- Badii, M. H., Castillo Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2017). Diseños experimentales e investigación científica. *Revista Innovaciones de Negocios*, 4(8), 283–330. <https://doi.org/10.29105/rinn4.8-5>
- Balany, F., Ng, A. W. M., Mutil, N., Muthukumaran, S., & Wong, M. S. (2020). Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water (Switzerland)*, 12(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 157–166. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056>
- Barradas, V. L. (1991). Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology*, 35(1), 24–28.



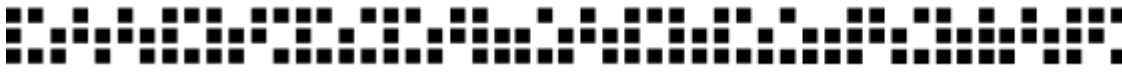
<https://doi.org/10.1007/BF01040959>

- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2020). Quantifying the seasonal cooling capacity of ‘green infrastructure types’ (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 203(February), 103893. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103893>
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166(March), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Bauman, Z. (2005). *Etica posmoderna* (1a ed.). Siglo XXI Editores.
- Béland, M., Baldocchi, D. D., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., & Verstraete, M. M. (2014). On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 82–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.005>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bréda, N. J. J. (2008). Leaf Area Index. *Encyclopedia of Ecology*, 2148–2154. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00849-1>
- Bruse, D., & Bruse, M. (2017). *Decoding Urban Nature Envi-Met*. 25.
- Bruse, M. (n.d.). *Knowledge Base: Obtaining Leaf Area Density Data*. ENVI-Met 3.1 Manual Index . Retrieved December 10, 2020, from <https://envi-met.info/documents/onlinehelpv3/hs890.htm>
- Bruse, M. (2017). *Modelling and strategies for improved urban climates*. xiv+155.
- Bruse, M. (2018). *ENVI-met*. <https://www.envi-met.com/overview/>
- Calvello, M. (2020). *Correlation vs. Regression Made Easy: Which to Use + Why*. G2. <https://www.g2.com/articles/correlation-vs-regression>
- Cambridge Dictionary. (n.d.). *Significado de SHADOW en el Diccionario Cambridge*. Retrieved December 5, 2020, from <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/shadow>
- Carron, L. T. (1968). *An Outline of Forest Mensuration with Special Reference to Australia*. (Autralian National University Press (ed.)). ANU Press.
- Chen, H., Ooka, R., Huang, H., & Tsuchiya, T. (2009). Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment*, 44(11), 2290–2299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.012>
- Closas, A., Arriola, E. A., Kuc Zening, C. I., Amarilla, M. R., & Jovanovich, E. C. (2013). Análisis multivariante, conceptos y aplicaciones en Psicología Educativa y



Psicometría. *Enfoques: Revista de La Universidad Adventista Del Plata*, ISSN 1514-6006, Vol. 25, N<sup>o</sup>. 1, 2013, Págs. 65-92, 25(1), 65–92. file:///D:/Escritorio/Dialnet-AnalisisMultivarianteConceptosYAplicacionesEnPsico-5229555.pdf

- Colombert, M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. No Title. Univ. Paris Est.
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205–218. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.05>
- Correa, E., Ruiz, M. A., Canton, A., & Lesino, G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*, 58, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>
- Deblonde, G., Penner, M., & Royer, A. (1994). Measuring Leaf Area Index with the Li-Cor LAI-2000 in Pine Stands. *Ecology*, 75(5), 1507. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1937474>
- Deering, R. B. (1953). Technology of the Cooling Effect of Trees and Shrubs. In *Housing and Building in Hot Humid and Hot Dry Climates*. National Academy of Sciences.
- Department of Health. (2015). Heatwave plan for England: Protecting health and reducing harm from severe heat and heatwaves. *Public Health England*, pp 46.
- Duarte, D. H. S., & Monteiro, L. M. (2016). Architecture, Urban Design, Planning and Urban Climate Interdisciplinary collaboration experiences in teaching and research. *PLEA 2016 Los Angeles 32, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Cities, Building, People: Towar Regenerative Enviroments*.
- Elwy, I., Ibrahim, Y., Fahmy, M., & Mahdy, M. (2018). Outdoor microclimatic validation for hybrid simulation workflow in hot arid climates against ENVI-met and field measurements. *Energy Procedia*, 153(November), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.009>
- Emmanuel, R., & Fernando, H. J. S. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: Role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research*, 34(3), 241–251. <https://doi.org/10.3354/cr00694>
- Erell, E., Pearlmutter, D., & William-son, T. (2010). *Urban microclimate: designing the spaces between building*. Earthscan.
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings* (1 st). Taylor & Francis.
- Fan, Y., Yang, R.-Y., & Wei, Y.-M. (2007). A system dynamics based model for coal investment. *Energy*, 32, 898–905.
- Gartland, L. (2012). Heat Islands: Understanding and mitigating heat in urban areas. In *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas* (Vol.

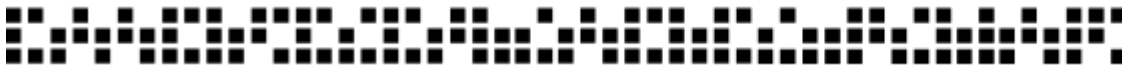


- 9781849771). <https://doi.org/10.4324/9781849771559>
- Genskow, L. R., Beimesch, W. E., Hecht, J. P., Kemp, I. C., Langrish, T., Schwartzbach, C., & Smith, L. (2008). Psychrometry , Evaporative Cooling , and Solids Drying. In D. W. Green & R. H. Perry (Eds.), *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8<sup>a</sup>, pp. 4–109). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071511350>
- Giguere, M. (2009). *Literature Review of Urban Heat Island Mitigation Strategies*. Gouvernement du Quebec.
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings, 1*, 11–23.
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. New Jersey: Princeton University Press.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Buildings and Urban Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- GLOBE Observer. (n.d.). *GLOBE Observer*. Retrieved March 20, 2023, from <https://observer.globe.gov/>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2016). *Plan de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Chihuahua: Vision 2040*.
- Gonsamo, A., Walter, J. M., Chen, J. M., Pellikka, P., & Schleppi, P. (2018). A robust leaf area index algorithm accounting for the expected errors in gap fraction observations. *Agricultural and Forest Meteorology, 248*(July 2017), 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.024>
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment, 70*(1), 29–51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
- Gregg, J. W., Jones, C. G., & Dawson, T. E. (2003). Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature, 424*(6945), 183–187.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., & Bai, X. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science, 319*(5864), 756–760.
- H. Ayuntamiento de Chihuahua. (2015). *Plan de Acción Climática Municipal*.
- Hair, J., Anderson, R., Babin, B., & Black, W. (2010). Multivariate Data Analysis.pdf. In *Australia : Cengage: Vol. 7 edition* (p. 758).
- Halper, E. B., Scott, C. A., & Yool, S. R. (2012). Correlating Vegetation, Water Use, and Surface Temperature in a Semiarid City: A Multiscale Analysis of the Impacts of Irrigation by Single-Family Residences. *Geographical Analysis, 44*(3), 235–257. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2012.00846.x>
- Hebbert, M., & Jankovic, V. (2013). Cities and climate change: the precedents and why they matter. *Urban Studies, 50*, 1332–1347.

- Hernández, A. (2013). *Manual de Diseño Bioclimático Urbano. Recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*.
- Hernández Goribar, E. (2001). *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración* (1ª). LIMUSA, S.A. de C.V.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la Investigación. In *Metodología de la investigación*.
- Holmer, B., Thorsson, S., & Lindén, J. (2013). Evening evapotranspirative cooling in relation to vegetation and urban geometry in the city of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Climatology*, 33(15), 3089–3105. <https://doi.org/10.1002/joc.3561>
- Howard, L. (1833). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it*. Harvey and Darton.
- Hsieh, C. M., Li, J. J., Zhang, L., & Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, 159, 382–397. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.045>
- Huang, J., Ritschar, R., Sampso, N., & Taha, H. (1992). The Benefits of Urban Trees. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, & S. Winnett (Eds.), *Cooling our Communities. A guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*.
- Huang, J., Ritschard, R., Sampson, N., & Taha, H. (1992). The Benefits of Urban Trees. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, & S. Winnett (Eds.), *Cooling our Communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing* (1st ed., pp. 27–42). U.S Government Printing Office.
- Huang, K. T., & Li, Y. J. (2017). Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings*, 154, 448–464. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.054>
- INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (n.d.). *Proyecciones de cambio climático*. Retrieved August 31, 2022, from [https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/Proyecciones/P\\_08.html](https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/Proyecciones/P_08.html)
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Jonsson, P. (2004). Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana. *International Journal of Climatology*, 24, 1307–1322. <https://doi.org/10.1002/joc.1064>
- Jorge Dagnino, S. (2014). Análisis de varianza. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(4), 306–310. <https://doi.org/10.2307/j.ctvv8k0.7>
- Kachigan, S. K. (1991). *Multivariate Statistical Analysis* (2ª ed.). New York: Radius Press.

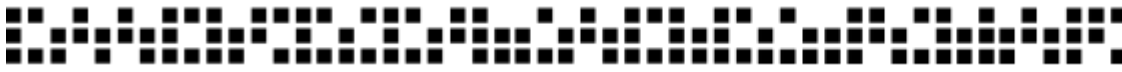


- Keim, S. M., Guisto, J. A., & Sullivan, J. B. (2002). Environmental thermal stress. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 9(1), 1–15.
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>
- Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82(11), 986–998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>
- Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., & Mavrogianni, A. (2012). London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, 47, 302–311.
- Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., & Ng, E. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 31, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.018>
- Krayenhoff, E. S., Jiang, T., Christen, A., Martilli, A., Oke, T. R., Bailey, B. N., Nazarian, N., Voogt, J. A., Giometto, M. G., Stastny, A., & Crawford, B. R. (2020). A multi-layer urban canopy meteorological model with trees (BEP-Tree): Street tree impacts on pedestrian-level climate. *Urban Climate*, 32(December 2019), 100590. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100590>
- Kuchelmeister, G. (2000). Trees for the urban millennium: Urban forestry update. *Unasylva*, 51(200), 49–55.
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Lalic, B., & Mihailovic, D. T. (2004). An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 43(4), 641–645. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0641:AERDLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0641:AERDLD>2.0.CO;2)
- Lang, A. R. . (1987). Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41(3–4), 179–186. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90078-5)
- Lesiuk, S. (1979). *Architectural and Enviromental Horticulture: An Investigation into the Use of Vegetation for Energy Conservation*.
- Li, X., Zhou, W., Ouyang, Z., Xu, W., & Zheng, H. (2012). Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: Evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology*, 27(6), 887–898. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9731-6>
- Lin, B. S., & Lin, Y. J. (2010). Cooling effect of shade trees with different characteristics

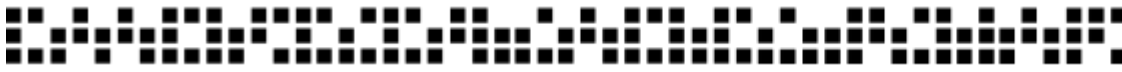


- in a subtropical urban park. *HortScience*, 45(1), 83–86.  
<https://doi.org/10.21273/hortsci.45.1.83>
- Lindén, J., Fonti, P., & Esper, J. (2016). Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.001>
- Liu, Z., Zheng, S., & Zhao, L. (2018). Evaluation of the ENVI-met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area. *Atmosphere*, 9(5).  
<https://doi.org/10.3390/ATMOS9050198>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Makido, Y., Hellman, D., & Shandas, V. (2019). Nature-based designs to mitigate urban heat: The efficacy of green infrastructure treatments in Portland, Oregon. *Atmosphere*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/atmos10050282>
- Mandeville, P. B. (2012). Diseños experimentales. *Ciencia UANL*, 15(57), 151–155.  
<https://www.redalyc.org/pdf/402/40223164022.pdf>
- Meir, P., Grace, J., & Miranda, A. C. (2000). Photographic method to measure the vertical distribution of leaf area density in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102(2–3), 105–111. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00122-2)
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2012). Leaf Area Measurements. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, XVII(May)*, 1–36.  
<http://www.schleppi.ch/patrick/publi/pdf/sfal13.pdf>
- Meyer, P. L. (1971). *Introductory Probability and Statistical Applications* (Second edi, Vol. 66, Issue 334). Addison-Wesley Publishing Company.  
<https://doi.org/10.2307/2283956>
- Miller, J. B. (1967). A formula for average foliage density. *Australian Journal of Botany*, 15(1), 141–144. <https://doi.org/10.1071/BT9670141>
- Molla, M. B. (2015). The Value of Urban Green Infrastructure and Its Environmental Response in Urban Ecosystem: A Literature Review. *International Journal of Environmental Sciences Mikias Biazen Molla International Journal of Environmental Sciences*, 4(2), 89–101.  
<http://www.water.ca.gov/wateruseefficiency/landscapeordinance/pubcomments/MelanieStanton/TurfgrassBenefitsLiteratureReviewforDevelopingNations.pdf>
- Montoya Márquez, J. A., Sánchez Estudillo, L., & Torres Hernández, P. (2011). Diseños experimentales ¿qué son y cómo se utilizan en las ciencias acuáticas? *Ciencia y Mar*, 15(43), 61–70.
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., Counsell, C. W. W., Dietrich, B. S., Johnston, E. T., Louis, L. V., Lucas, M. P., Mckenzie, M. M., Shea, A. G., Tseng, H., Giambelluca, T. W., Leon, L. R.,

- Hawkins, E., & Trauernicht, C. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501–506. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K. L., & Ng, E. (2019). Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37(September 2017), 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Morakinyo, T. E., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, 137(January), 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.012>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- Moreno, S. (2008). Habitabilidad urbana como condición de calidad de vida. *Palapa*, 3, 48–52.
- Morgan, G., & Gilbert, M. C. (2002). What We Know ( and Don ' T Know ) About the Basement of the. *Scientist*, April, 31–35. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5122.2645>
- Moss, J. L., Doick, K. J., Smith, S., & Shahrestani, M. (2019). Influence of evaporative cooling by urban forests on cooling demand in cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.023>
- Motazedian, A., & Leardini, P. (2012). Impact of green infrastructures on urban microclimates. A critical review. *Anzasca.Net*, 1988. <http://anzasca.net/wp-content/uploads/2014/08/p381.pdf>
- Newman, P., & Jennings, I. (2008). Cities as sustainable ecosystems: principles and practices. *Island Press*.
- Norman, J. M., & Campbell, G. S. (1989). Canopy structure. In C. and Hall (Ed.), *Plant physiological ecology: field methods and instrumentation* (pp. 301–323).
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>
- Oke, T. R. (1989). The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions - Royal Society of London, B*, 324(1223), 335–349. <https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0051>
- Oke, T. R., Crowther, J. M., McNaughton, K. G., Monteith, J. L., & Gardiner, B. (1989). The micrometeorology of the urban forest. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B, Biol.*, 324, 335–349.
- Olgay, A., & Olgay, V. (1957). *Solar Control and Shading Devices*. Princeton University Press.



- Olgay, V. (1963). *Arquitectura y Clima: Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas* (S. L. Gustavo Gili (ed.); 1<sup>a</sup>). Princeton University Press.
- Ouyang, W., Morakinyo, T. E., Ren, C., & Ng, E. (2020). The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Building and Environment*, 174(December 2019), 106772. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106772>
- Ow, L. F., Ghosh, S., & Yusof, M. L. M. (2019). Growth of *Samanea saman*: Estimated cooling potential of this tree in an urban environment. *Urban Forestry and Urban Greening*, 41(July 2018), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.021>
- Ozkeresteci, I., Crewe, K., Brazel, A. J., & Bruse, M. (2003). Use and evaluation of the ENVI-MET model for environmental design and planning: an experiment on linear parks. *21st International Cartographic Conference (ICC), August*, 10–16.
- Pardo, A., Garrido, J., Ruiz, M. Á., & Martín, R. S. (2007). La interacción entre factores en el análisis de varianza: Errores de interpretación. *Psicothema*, 19(2), 343–349.
- Park, M., Hagishima, A., Tanimoto, J., & Narita, K. ichi. (2012). Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment*, 56, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.015>
- Pérez Maldonado, A. (1999). *La construcción de indicadores Bio-Ecológicos para medir la calidad del ambiente natural urbano*.
- Pooch, U. W., & Wall, J. A. (1992). *Discrete event simulation*. Texas A&M University.
- Rana, G., De Lorenzi, F., Mazza, G., Martinelli, N., Muschitiello, C., & Ferrara, R. M. (2020). Tree transpiration in a multi-species Mediterranean garden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280(September 2019), 107767. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107767>
- Research Prospect. (n.d.). *Step-by-Step Guide to Statistical Analysis - Research Prospect*. Retrieved April 3, 2023, from <https://www.researchprospect.com/category/statistics/>
- Robinette, G. O. (1972). *Plants/People/and Enviromental Quality*. U.S. Department of the Interior.
- Ross, J., Ross, V., & Koppel, A. (2000). Estimation of leaf area and its vertical distribution durin growth period. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101, 237–246. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00122-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00122-2)
- Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E., & Ding, W. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation*, 12(2), 183–194. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Saillard, M. (1962). Infraestructure. *Urbanisme*.
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met



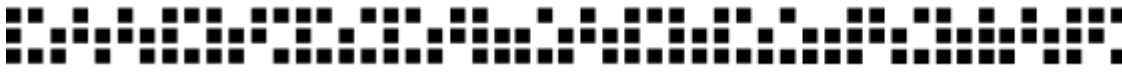
- simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Sánchez-Díaz, M., & Aguirreolea, J. (2008). Transpiración y Control Estomático. In J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (2<sup>a</sup>, pp. 41–56). McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2017). Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 157, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>
- Saxena, M. (2001). *Microclimate Modification: Calculating the effect of trees on air temperature*. [https://www.researchgate.net/publication/35005662\\_Microclimate\\_modification\\_calculating\\_the\\_effect\\_of\\_trees\\_on\\_air\\_temperature\\_in\\_residential\\_neighborhoods](https://www.researchgate.net/publication/35005662_Microclimate_modification_calculating_the_effect_of_trees_on_air_temperature_in_residential_neighborhoods)
- Saxena, M. (2002). Microclimate modification: calculating the effect of trees on air temperature. *ASES National Solar Energy Conference, Solar 2002, January 2002*.
- Schleppy, P. (2020). *Hemisfer 3*.
- Scribbr. (n.d.). *The Beginner's Guide to Statistical Analysis | 5 Steps & Examples*. Retrieved April 3, 2023, from <https://www.scribbr.com/category/statistics/>
- Shannon, R. E. (1975). Systems Simulation. In *The art and science*.
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(99)00018-3)
- Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy Policy*, 36(12), 4558–4562. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.011>
- Smithers, R. J., Doick, K. J., Burton, A., Sibille, R., Steinbach, D., Harris, R., Groves, L., & Blicharska, M. (2018). Comparing the relative abilities of tree species to cool the urban environment. *Urban Ecosystems*, 21(5), 851–862. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0761-y>
- Stadt, K. J., & Lieffers, V. J. (2000). MIXLIGHT: A flexible light transmission model for mixed-species forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102(4), 235–252. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00128-3)
- Stephens, L. J., & Spiegel, M. R. (2009). *Estadística*. McGraw-Hill México.
- Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(October 2016), 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Tan, P. Y., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Schmiele, K., & Chiam, Z. Q. (2020). Transpiration and cooling potential of tropical urban trees from different native habitats. *Science of the Total Environment*, 705, 135764.





<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135764>

- Tapia, D., & García, J. (2001). Análisis Factorial y Componentes Principales: su Uso para Modelos Macroeconómicos de la Economía Mexicana. *Economía y Sociedad*, 6. file:///C:/Users/minte/Downloads/Dialnet-AnalisisFactorialYComponentesPrincipales-5900511.pdf
- Taslim, S., Parapari, D. M., & Shafaghat, A. (2015). Urban design guidelines to mitigate urban heat island (UHI) effects in hot-dry cities. *Jurnal Teknologi*, 74(4), 119–124. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4619>
- Thimonier, A., Sedivy, I., & Schleppe, P. (2010). Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: A comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 543–562. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0353-8>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(September 2016), 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Torriente, D., & Torres, V. (2010). El análisis de componentes principales en la interpretación de sistemas agroecológicos para el manejo de rizo bacterias promotoras del crecimiento vegetal para el cultivo de la caña de azúcar. *IDESIA*, 28, 23–32.
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43(July), 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- Vaz Monteiro, M., Handle, P., Morison, J. I. L., & Doick, K. J. (2019). The role of urban trees and greenspaces in reducing urban air temperatures. *Forest Research; Research Report, January*, 1–12.
- Velez-Pareja, I. (2003). *Sensitivity Analysis (Análisis De Sensibilidad)*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.986887>
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: Modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. *Informacion Tecnologica*, 24(1), 15–24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100003>
- Völker, S., Baumeister, H., Classen, T., Hornberg, C., & Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space - A health geographic perspective. *Erdkunde*, 67(4), 355–371. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2013.04.05>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wai, K. M., Tan, T. Z., Morakinyo, T. E., Chan, T. C., & Lai, A. (2020). Reduced



- effectiveness of tree planting on micro-climate cooling due to ozone pollution—A modeling study. *Sustainable Cities and Society*, 52(August 2019), 101803.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101803>
- Wang, W., Zhang, B., Zhou, W., Lv, H., Xiao, L., Wang, H., Du, H., & He, X. (2019). The effect of urbanization gradients and forest types on microclimatic regulation by trees, in association with climate, tree sizes and species compositions in Harbin city, northeastern China. *Urban Ecosystems*, 22(2), 367–384.  
<https://doi.org/10.1007/s11252-019-0823-9>
- Wang, Y., & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 27, 122–128.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.013>
- Watson, D. J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany*, 11(1), 41–76.  
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083148>
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 37–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>
- Whiston Spirn, A., & Naudé Santos, A. (1981). *Plants for passive cooling*.
- Zhang, L., Zhan, Q., & Lan, Y. (2018). Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*, 130(September 2017), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>
- Zhao, Q., Yang, J., Wang, Z.-H., & Wentz, E. (2018). Assessing the Cooling Benefits of Tree Shade by an Outdoor Urban Physical Scale Model at Tempe, AZ. *Urban Science*, 2(1), 4. <https://doi.org/10.3390/urbansci2010004>
- Zheng, S., Guldman, J. M., Liu, Z., Zhao, L., Wang, J., & Pan, X. (2020). Modeling of shade creation and radiation modification by four tree species in hot and humid areas: Case study of Guangzhou, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 47(March 2019), 126545. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126545>
- Zhou, W., Shen, X., Cao, F., & Sun, Y. (2019). Effects of Area and Shape of Greenspace on Urban Cooling in Nanjing, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 145(4), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000520)
- Zupancic, T., Westmacott, C., & Bulthuis, M. (2015a). *The impact of green space on heat and air pollution in urban communities : A meta-narrative systematic review* (Issue March).
- Zupancic, T., Westmacott, C., & Bulthuis, M. (2015b). *The impact of green space on heat and air pollution in urban communities: A meta-narrative systematic review* (D. S. Foundation (ed.)). David Suzuki Foundation.

<http://www.davidsuzuki.org/publications/ImpactofGreenSpaceonHeatandAirPollutioninUrbanCommunities.pdf>



### Anexo

*Anexo A. Tabla de vegetación con características para el Municipio de Chihuahua*

ARBOLES		sistema radical		Crecimiento máximo aprox. (en metros)	Follaje	Tipo de follaje						Espacio óptimo entre árboles adultos (m)	Crecimiento	Necesidad de riego	Servicio ambiental proporcionado	Propuesta de plantación																		
Nombre común	Nombre científico	Profundo	Superficial	Altura total	Díametro de la copa	Caducifolio	Perennifolio	Muy denso	Denso	Mediano	Liviano	La separación ideal es con noca de copas	Rápido	Mediano	Lento	Alta	Media	Baja	Barra rompe vientos	Sombra reguladora temperatura	Estético	Mejorador de suelo	Parques	Plazas	Jardines	Área verde de banquetas	Camellones	Lecho de ríos y arroyos	Estacionamientos	Jelias				
CEDRO BLANCO	<i>Cupressus arizonica</i>		☉	20	3		☉		☉			5	☉						☉	☉	☉	☉								☉				
CEDRO LIBANES	<i>Cedrus libanensis-deodara</i>	☉		25	2		☉		☉			15								☉	☉	☉												
CIPRES ITALIANO	<i>Cupressus sempervirens</i>	☉		15	2		☉			☉		5	☉							☉	☉	☉												
ENCINO	<i>Quercus spp.</i>	☉		7	3	☉			☉			5		☉						☉	☉	☉												
FLAMA CHINA	<i>Koelreuteria bipinnata</i>	☉		3	3					☉		5		☉						☉	☉	☉												
FRESNO	<i>Fraxinus undei</i>	☉		12	3	☉				☉		10	☉							☉	☉	☉												
HUIZACHE	<i>Acacia farnesiana</i>		☉	5	4	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
LILA	<i>Amelia azedarach</i>	☉		4	4	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
MEZQUIT E	<i>Prosopis glandulosa</i>	☉		5	3	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
MIMBRE	<i>Chilopsis linearis</i>	☉		5	3	☉				☉		4		☉						☉	☉	☉												
MORO	<i>Morus nigra</i>	☉		5	4	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
PALMA ABANICO	<i>Washingtonia spp</i>		☉	5	3	☉				☉		8		☉							☉	☉												
PALMA DATILERA	<i>Phoenix dactylifera</i>		☉	15	3	☉	☉			☉		8		☉							☉	☉												
PALO VERDE	<i>Parkinsonia aculeata</i>	☉		4	3	☉				☉		4		☉						☉	☉	☉												
PINO ALEPO	<i>Pinus alepensis</i>	☉		15	6	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
PINO EL DARCÍ	<i>Pinus brutia</i>	☉		15	6	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
SAUCE LLORON	<i>Salix babilonica</i>	☉		12	8	☉				☉		10		☉						☉	☉	☉												
TASCATE	<i>Juniperus deppeana</i>	☉		5	3	☉				☉		4		☉						☉	☉	☉												
TRUENO	<i>Ligustrum japonicum</i>		☉	5	3					☉		4								☉	☉	☉												
TUJA	<i>Thuja occidentalis</i>		☉	3	3	☉	☉					3		☉						☉	☉	☉												
SICOMORO	<i>Platanus occidentalis</i>	☉		15	8	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												
ALAMO DE RIO	<i>Populus deltoides</i>		☉	25	6	☉				☉		8		☉						☉	☉	☉												
ALAMO ITALIANO	<i>Populus nigra</i>	☉		15	3	☉				☉		3		☉						☉	☉	☉												
ALAMO PLATEADO	<i>Populus alba</i>	☉		15	3	☉				☉		5		☉						☉	☉	☉												



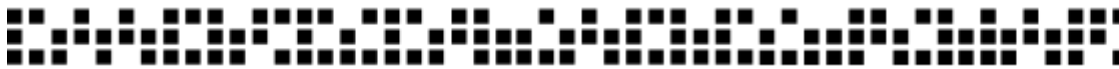
## Apéndices

### Apéndice A. Análisis para identificar día representativo

Dia	Hora																								NR
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Junio 1	22.5	21.6	21	20.5	20.1	20.4	22.9	25.7	28.5	30.6	32.3	32.6	32.8	32.8	32.6	32.2	31.1	29.9	28.4	27.3	26.2	25.2	24	22.8	3
2	22.3	21.7	21.4	21.1	20.8	21.2	23.9	26.6	29.3	31.6	33.5	33.1	32.7	32.3	31.7	31.1	30.2	29.1	27.8	27.1	26.4	25.7	25	24.2	3
3	23.7	23.2	22.9	22.7	22.5	23	24.7	26.2	26.8	27.9	29	30.8	33	33.3	32.6	32.4	31.4	30.3	29.3	28.2	27.1	26	24.9	23.7	8
4	22.4	21	20.2	19.4	18.9	19.3	21	22	23.2	24.3	25.1	26.2	27	27.8	28.1	28.2	28.2	27.7	26.5	25.3	24	22.7	21.4	20.2	0
5	19.5	18.9	18.5	18.1	17.8	18.2	21	23.8	26.4	28.7	30.7	32.3	33.5	34.3	34.6	34.5	33.6	32.2	30.3	28.9	27.4	26	24.5	22.9	5
6	21.8	20.5	19.9	19.2	18.7	19	21.3	23.7	25.9	27.8	29.4	30.7	31.7	32.4	32.6	32.4	31.7	30.4	28.8	27.3	25.9	24.5	22.9	21.3	0
7	20.4	19.4	18.9	18.3	17.9	18.2	20.6	22.9	25.3	27.3	29	30.4	31.5	32.2	32.5	32.3	31.6	30.4	28.7	27.1	25.6	24	22.4	20.8	0
8	19.6	18.2	17.4	16.6	16.1	16.2	18.5	20.8	22.9	24.9	26.4	27.6	28.5	29	29.1	28.8	27.9	26.5	24.7	23.4	22	20.7	19.4	18.1	0
9	18.1	18.1	18.1	18	18	18.5	20.6	22.8	25.2	27	28.5	29.8	30.7	31.1	31.3	30.9	30	28.8	27.5	26.5	25.5	24.5	23.4	22.4	0
10	21.4	20.2	19.6	19	18.5	18.7	21.2	23.7	26	28	29.7	31.1	32.2	32.8	33	32.9	32.1	30.8	29	28.1	27.2	26.4	25.5	24.6	1
11	24.5	24.2	24.2	24.1	24	24.6	26.1	26.5	27	28	30.3	31.4	31.8	30.7	30.4	31.1	31.6	31.3	30.5	29.4	28.4	27.3	26.3	25.2	8
12	24.1	22.9	22.2	21.6	21.1	21.4	23.7	26	28	29.9	31.5	32.9	33.9	34.5	34.7	34.5	33.8	32.6	31	29.6	28.3	26.9	25.6	24.2	12
13	23.3	22.5	22	21.5	21.2	21.5	24.2	26.8	29.2	31.4	33.2	34.8	35.9	36.7	37	36.9	36.2	34.9	33.1	31.9	30.8	29.6	28.4	27.2	1
14	26.4	25.6	25.2	24.8	24.6	24.8	26.1	28	28.6	30.7	32.4	34.2	34.9	33.4	32.1	31	30.1	29.3	28.6	28.1	27.6	27.2	26.7	26.3	2
15	25.6	24.9	24.6	24.1	23.9	24	24.3	24.9	25.1	25.6	25.7	26.4	27.7	29.1	30.4	31.3	31.8	31.9	31.1	30	28.9	27.8	26.7	25.6	6
16	24.3	22.9	22.2	21.4	20.9	21.1	23.6	26	28.3	30.3	32.1	33.6	34.7	35.4	35.7	35.6	34.9	33.6	31.8	30.1	28.3	26.5	24.8	22.9	5
17	21.6	20.3	19.5	18.7	18.1	18.4	21.1	23.8	26.3	28.5	30.4	31.9	33.1	33.8	34	33.8	33	31.6	29.6	28.5	27.5	26.4	25.3	24.2	7
18	23.9	23.6	23.5	23.4	23.3	23.5	25.6	27.9	29.3	30.7	32.4	33.5	34	34.9	35.1	34	33.2	32.2	31.1	30	29.4	28.7	28.1	27.5	7
19	26.9	26.5	26.2	26	25.9	26.3	28.2	30.1	31.9	33.8	35.4	36.7	37.7	38.3	38.7	38.7	38.2	37.3	36.1	35	33.9	32.8	31.7	30.7	0
20	29.2	27.8	27.1	26.3	25.8	26.1	27.9	29.7	31.5	33.2	34.6	35.8	36.7	37.3	37.6	37.6	37.1	36.2	35	33.8	32.5	31.2	29.9	28.6	0
21	27.4	26.1	25.5	24.9	24.5	24.7	26.7	28.8	30.8	32.7	34.3	35.6	36.7	37.3	37.7	37.6	37.1	36	34.7	33.4	32.1	30.9	29.7	28.5	0
22	27.3	26.1	25.4	24.8	24.3	24.6	26.5	28.5	30.4	32.1	33.7	35	36	36.7	37	36.9	36.3	35.3	33.9	32.5	31.3	30.2	29	27.8	0
23	26.9	26	25.5	25	24.6	24.8	26.9	29.1	31.5	33.8	36.1	36.3	36.4	36.7	36.5	35.9	35.1	34	32.7	31.4	29.9	28.4	27	25.5	1
24	24.4	23.3	22.7	22.1	21.8	22.1	24.7	27.2	29.6	31.8	33.8	35.3	36.5	37.3	37.6	37.5	36.7	35.4	33.8	32.2	31	29.7	28.5	27.2	7
25	26	24.9	24.2	23.6	23.2	23.5	25.8	28.1	30.3	32.4	34.2	35.7	36.8	37.5	37.9	37.9	37.3	36.2	34.8	33.3	32.3	31.3	30.3	29.3	0
26	28.2	27.1	26.5	25.9	25.5	25.6	26.7	27.9	29	30	30.9	31.4	31.8	32.1	32.2	31.9	31.3	30.5	29.6	28.9	27.9	26.8	25.8	24.8	6
27	24.2	23.5	23.2	22.9	22.6	22.9	24	25.3	26	26.3	27.4	28.6	30.4	31.8	32.8	33.7	33.9	33.5	32.4	31.2	30.5	29.9	29.3	28.7	5
28	28.2	27.7	27.4	27.1	26.9	27.1	27.8	28	29	29.3	30.1	30.4	30.7	30.8	31	31.1	30.9	30.6	30.1	29.6	28.8	27.9	27	26.2	3
29	25.5	24.7	24.2	23.8	23.5	23.8	24.9	26.1	27.9	28.6	28.8	29.1	29.5	30.3	31.4	31.5	31.8	31.4	30.5	29.6	28.4	27.2	26	24.8	8
30	23.9	22.8	22.2	21.6	21.1	21.3	24	26.5	29	31.2	33.1	33.2	33.3	33.4	33.3	32.6	31.9	30.9	29.5	28.1	27	25.9	24.8	23.6	7
PM	24.1	23.2	22.7	22.2	21.9	22.2	24.2	26.1	27.9	29.6	31.1	32.2	33.1	33.5	33.7	33.6	33.0	32.0	30.7	29.5	28.4	27.3	26.1	25.0	
Rmi	23.6	22.7	22.2	21.7	21.4	21.7	23.7	25.6	27.4	29.1	30.6	31.7	32.6	33.0	33.2	33.1	32.5	31.5	30.2	29.0	27.9	26.8	25.6	24.5	
Rma	24.6	23.7	23.2	22.7	22.4	22.7	24.7	26.6	28.4	30.1	31.6	32.7	33.6	34.0	34.2	34.1	33.5	32.5	31.2	30.0	28.9	27.8	26.6	25.5	

PM = Promedio mensual Rmi: Mínimo del rango Rma= Máximo del rango NR = Numero de horas dentro del rango

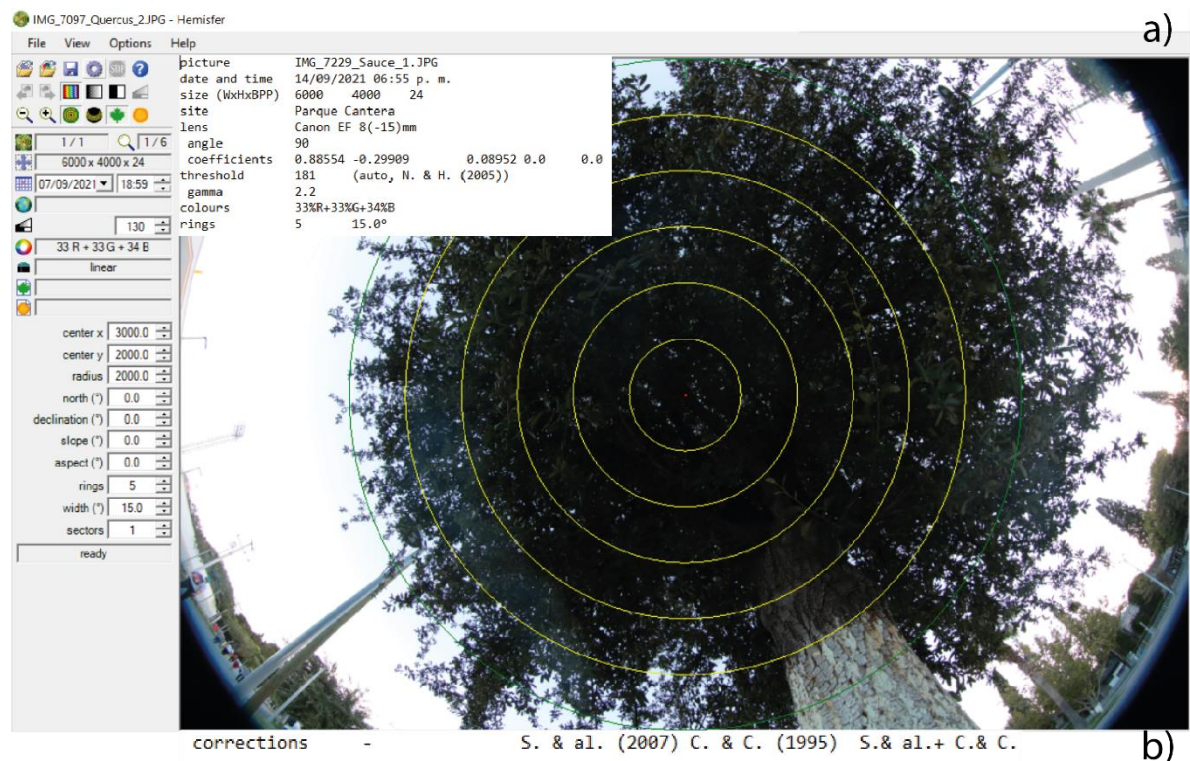
Horas dentro del rango



## Apéndice B. Análisis de índice de área foliar de vegetación arbórea en Ciudad Chihuahua, Chih. México

Con la finalidad de procesar la información de la vegetación se realizó un análisis mediante el Software Hemisfer de elementos vegetales arbóreos de áreas verdes en la ciudad de Chihuahua, como Ciudad deportiva, Parque Cantera, Parque extremo, Parque Los tronquitos y Parque El Palomar.

### Procesamiento de imágenes en Hemisfer



corrections	-		S. & al. (2007)		C. & C. (1995)		S. & al.+ C. & C.	
methods	LAI	angle	LAI	angle	LAI	angle	LAI	angle
Miller (1967)	2.71	-	2.71	-	2.91	-	2.91	-
LiCor LAI2000	2.40	0	2.40	0	2.59	0	2.59	0
Lang (1987)	2.69	-	2.69	-	2.89	-	2.89	-
G. & al. (2018)	2.19	-	2.19	-	2.45	-	2.45	-
N. & C. (1989)	2.04	9	2.04	9	2.26	10	2.25	10
T. & al. (2010)	2.15	0	2.15	0	2.32	0	2.32	0
methods	Fmv	Frv	Fmv	Frv	Fmv	Frv	Fmv	Frv
N. & C. (1989)	13.9%	-	13.9%	-	13.9%	3.76%	13.9%	3.75%
T. & al. (2010)	11.7%	-	11.7%	-	11.7%	2.66%	11.7%	2.66%

Nota: a) Procesamiento de imagen; b) Calculo de índice de área foliar

Catálogo de árboles analizados



IMG\_7053\_Moro\_1



IMG\_7055\_Lila\_1



IMG\_7059\_Fresno\_1



IMG\_7062\_Olmo\_1



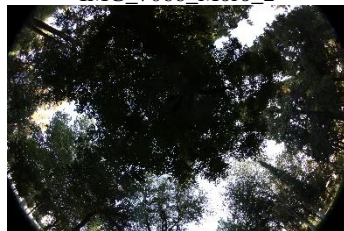
IMG\_7066\_Moro\_2



IMG\_7070\_Abedul\_1



IMG\_7073\_Alamo\_1



IMG\_7077\_Lila\_2



IMG\_7081\_Acer\_1



IMG\_7085\_Moro\_3



IMG\_7089\_Moro\_4



IMG\_7094\_Quercus\_1



IMG\_7097\_Quercus\_2



IMG\_7102\_Quercus\_3



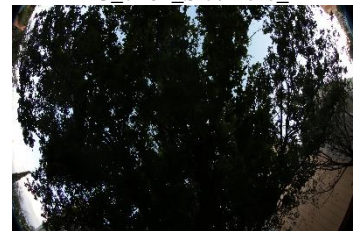
IMG\_7104\_Sicomoro\_1



IMG\_7110\_Fraxinus\_1



IMG\_7113\_Lilia\_3



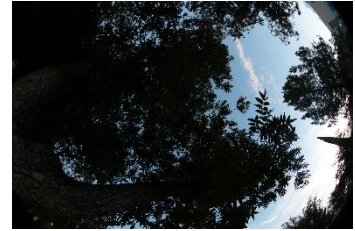
IMG\_7118\_Acer\_2



IMG\_7127\_Nogal\_1



IMG\_7130\_Nogal\_2



IMG\_7135\_Nogal\_3



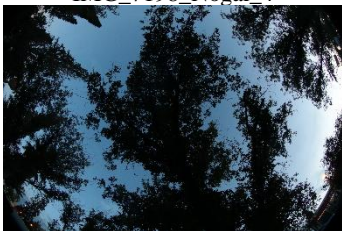
IMG\_7198\_Nogal\_4



IMG\_7144\_Nogal\_5



IMG\_7150\_Nogal\_6



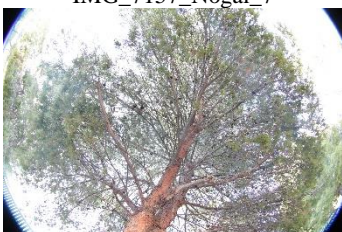
IMG\_7157\_Nogal\_7



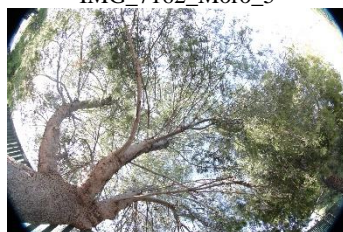
IMG\_7162\_Moro\_5



IMG\_7171\_Moro\_6



IMG\_7173\_Pino\_1



IMG\_7179\_Pino\_2



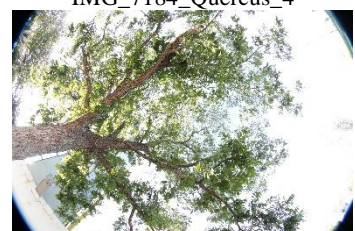
IMG\_7184\_Quercus\_4



IMG\_7191\_Quercus\_5



IMG\_7194\_Quercus\_6



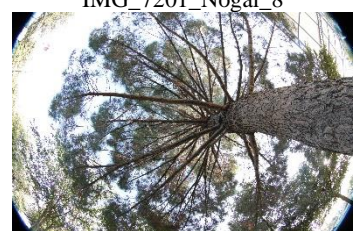
IMG\_7201\_Nogal\_8



IMG\_7204\_Quercus\_7

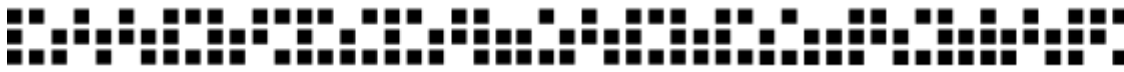


IMG\_7209\_Quercus\_8



IMG\_7210\_Pino\_3





IMG\_7213\_Quercus\_9



IMG\_7217\_Acacia\_1



IMG\_7220\_Acacia\_2



IMG\_7224\_Moro\_7



IMG\_7226\_Quercus\_10



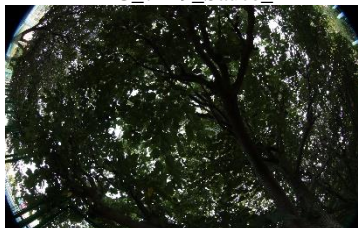
IMG\_7229\_Sauce\_1



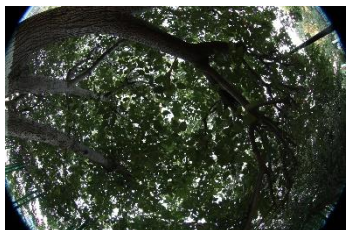
IMG\_7237\_Alamo\_2



IMG\_7242\_Moro\_8



IMG\_7251\_Moro\_9



IMG\_7254\_Moro\_10



IMG\_7259\_Moro\_11



IMG\_7266\_Sauce\_2



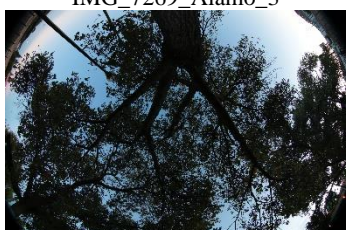
IMG\_7269\_Alamo\_3



IMG\_7277\_Lila\_4



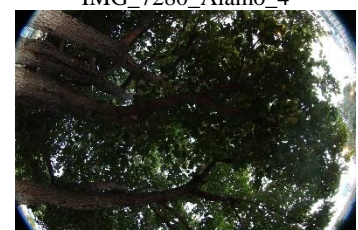
IMG\_7280\_Alamo\_4



IMG\_7284\_Alamo\_5



IMG\_7288\_Alamo\_6



IMG\_7295\_Moro\_12



IMG\_7301\_Alamo\_7



IMG\_7307\_Alamo\_8



IMG\_7301\_Sicomoro\_2



IMG\_7316\_Alamo\_9



IMG\_7321\_Fraxinus\_2



IMG\_7327\_Sicomoro\_3



IMG\_7328\_Fraxinus\_3



IMG\_7335\_Huizache\_1



IMG\_7339\_Huizache\_2



IMG\_7341\_Fraxinus\_4



IMG\_7347\_Sicomoro\_4



IMG\_7355\_Alamo\_10



IMG\_7358\_Sicomoro\_5



IMG\_7363\_Alamo\_11



IMG\_7366\_Alamo\_12



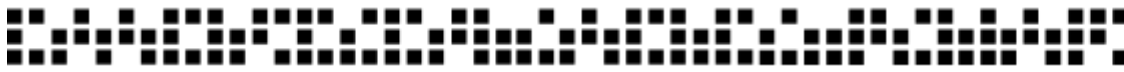
IMG\_7372\_Lila\_5



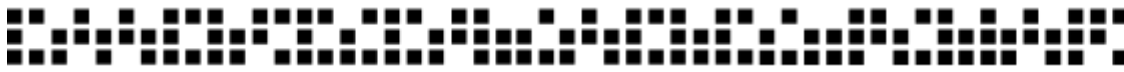
IMG\_7373\_Lila\_6



#	Archivo	Nombre común	Lugar	Modelos de Índice de área foliar (Leaf Area Index)							Promedio
				Miller (1967)	LiCor LAI2000	Lang (1987)	G. & al. (2018)	N. & C. (1989)	T. & al. (2010)		
1	IMG_7053_Moro_1.JPG	Moro	D	4.51	3.81	4.53	3.15	3.57	3.52	3.85	
2	IMG_7055_Lila_1.JPG	Lila	D	3.94	3.48	3.99	2.87	3.16	3.27	3.45	
3	IMG_7059_Fresno_1.JPG	Fresno	D	2.74	2.53	2.76	2.31	2.42	2.43	2.53	
4	IMG_7062_Olmo_1.JPG	Olmo	D	3.13	2.80	3.19	2.55	2.58	2.47	2.79	
5	IMG_7066_Moro_2.JPG	Moro	D	5.04	4.46	5.13	4.01	4.13	3.99	4.46	
6	IMG_7070_Abedul_1.JPG	Abedul	D	3.85	3.42	3.87	3.48	3.04	3.05	3.45	
7	IMG_7073_Alamo_1.JPG	Álamo	D	2.65	2.33	2.65	2.68	2.05	2.10	2.41	
8	IMG_7077_Lila_2.JPG	Lila	D	6.19	5.48	6.29	4.97	5.05	4.89	5.48	
9	IMG_7081_Acer_1.JPG	Acer	D	3.91	3.37	3.98	2.94	3.21	3.07	3.41	
10	IMG_7085_Moro_3.JPG	Moro	D	5.12	4.49	5.18	4.04	4.13	4.03	4.50	
11	IMG_7089_Moro_4.JPG	Moro	D	3.66	3.06	3.78	2.76	3.17	2.83	3.21	
12	IMG_7094_Quercus_1.JPG	Quercus	D	4.46	3.80	4.50	3.31	3.58	3.49	3.86	
13	IMG_7097_Quercus_2.JPG	Quercus	D	6.03	4.98	6.14	4.06	5.00	4.68	5.15	
14	IMG_7102_Quercus_3.JPG	Quercus	D	5.35	4.47	5.51	3.74	4.56	4.16	4.63	
15	IMG_7104_Sicomoro_1.JPG	Sicomoro	D	1.68	1.47	1.77	1.27	1.52	1.31	1.50	
16	IMG_7110_Fraxinus_1.JPG	Fraxinus	D	2.99	2.57	2.96	2.44	2.26	2.35	2.60	
17	IMG_7113_Lila_3.JPG	Lila	D	2.58	2.25	2.63	1.97	2.12	2.03	2.26	
18	IMG_7118_Acer_2.JPG	Acer	D	4.77	4.11	4.89	3.65	4.04	3.72	4.20	
19	IMG_7127_Nogal_1.JPG	Nogal	D	2.77	2.37	2.82	2.07	2.28	2.16	2.41	
20	IMG_7130_Nogal_2.JPG	Nogal	D	2.94	2.55	2.95	2.61	2.31	2.32	2.61	
21	IMG_7138_Nogal_4.JPG	Nogal	D	2.64	2.26	2.63	2.40	2.04	2.08	2.34	
22	IMG_7144_Nogal_5.JPG	Nogal	D	3.62	3.16	3.68	2.74	2.95	2.86	3.17	
23	IMG_7150_Nogal_6.JPG	Nogal	D	1.70	1.52	1.75	1.39	1.45	1.35	1.53	
24	IMG_7179_Pino_2.JPG	Pino	P	1.75	1.54	1.77	1.33	1.41	1.39	1.53	
25	IMG_7184_Quercus_4.JPG	Quercus	P	4.94	4.37	4.99	4.36	3.95	3.91	4.42	
26	IMG_7191_Quercus_5.JPG	Quercus	P	3.53	3.19	3.57	2.89	2.88	2.80	3.14	
27	IMG_7194_Quercus_6.JPG	Quercus	P	6.22	5.64	6.25	5.13	5.21	5.22	5.61	
28	IMG_7201_Nogal_8.JPG	Nogal	P	1.60	1.43	1.60	1.68	1.29	1.35	1.49	
29	IMG_7204_Quercus_7.JPG	Quercus	P	3.60	3.06	3.66	2.61	2.96	2.82	3.12	
30	IMG_7209_Quercus_8.JPG	Quercus	P	3.72	3.34	3.78	2.98	3.02	3.02	3.31	
31	IMG_7210_Pino_3.JPG	Pino	P	2.24	1.86	2.32	1.69	1.95	1.73	1.97	



#	Archivo	Nombre común	Lugar	Modelos de Índice de área foliar (Leaf Area Index)							Promedio
				Miller (1967)	LiCor LAI2000	Lang (1987)	G. & al. (2018)	N. & C. (1989)	T. & al. (2010)		
32	IMG_7213_Quercus_9.JPG	Quercus	P	3.99	3.34	4.08	2.84	3.34	3.10	3.45	
33	IMG_7217_Acacia_1.JPG	Acacia	P	1.42	1.22	1.42	1.36	1.10	1.12	1.27	
34	IMG_7220_Acacia_2.JPG	Acacia	P	1.92	1.59	1.99	1.37	1.66	1.49	1.67	
35	IMG_7224_Moro_7.JPG	Moro	P	3.09	2.75	3.08	2.89	2.43	2.49	2.79	
36	IMG_7226_Quercus_9.JPG	Quercus	P	3.50	3.05	3.57	2.71	2.91	2.75	3.08	
37	IMG_7229_Sauce_1.JPG	Sauce	C	2.71	2.40	2.69	2.19	2.04	2.15	2.36	
38	IMG_7237_Alam0_2.JPG	Álam0	C	3.08	2.83	3.12	2.64	2.65	2.59	2.82	
39	IMG_7242_Moro_8.JPG	Moro	C	4.43	3.92	4.46	3.60	3.53	3.50	3.91	
40	IMG_7251_Moro_9.JPG	Moro	C	4.50	4.03	4.52	3.58	3.60	3.64	3.98	
41	IMG_7254_Moro_10.JPG	Moro	C	4.03	3.58	4.01	3.45	3.19	3.28	3.59	
42	IMG_7259_Moro_11.JPG	Moro	C	5.48	4.80	5.71	4.15	4.83	4.31	4.88	
43	IMG_7266_Sauce_2.JPG	Sauce	C	2.58	2.31	2.62	2.10	2.10	2.05	2.29	
44	IMG_7269_Alam0_3.JPG	Álam0	C	3.29	3.01	3.31	3.10	2.82	2.85	3.06	
45	IMG_7277_Lila_4.JPG	Lila	C	6.54	5.58	6.61	4.91	5.26	5.13	5.67	
46	IMG_7280_Alam0_4.JPG	Álam0	E	2.54	2.24	2.58	2.01	2.08	2.00	2.24	
47	IMG_7284_Alam0_5.JPG	Álam0	E	2.34	2.02	2.35	1.87	1.83	1.84	2.04	
48	IMG_7288_Alam0_6.JPG	Álam0	E	3.16	2.83	2.23	2.58	2.61	2.51	2.65	
49	IMG_7295_Moro_12.JPG	Moro	E	5.34	4.78	5.39	4.45	4.29	4.23	4.75	
50	IMG_7301_Alam0_7.JPG	Álam0	E	1.58	1.40	1.68	1.14	1.49	1.24	1.42	
51	IMG_7307_Alam0_8.JPG	Álam0	E	1.85	1.60	1.92	0.89	1.62	1.44	1.55	
52	IMG_7310_Sicomoro_2.JPG	Sicomoro	T	1.66	1.44	1.67	1.24	1.32	1.30	1.44	
53	IMG_7316_Alam0_9.JPG	Álam0	T	2.22	1.92	2.23	1.84	1.75	1.75	1.95	
54	IMG_7321_Fraxinus_2.JPG	Fraxinus	T	2.84	2.50	2.87	2.13	2.25	2.26	2.48	
55	IMG_7327_Sicomoro_3.JPG	Sicomoro	T	1.27	1.09	1.27	1.14	0.98	1.00	1.13	
56	IMG_7328_Fraxinus_3.JPG	Fraxinus	T	3.57	3.07	3.66	2.79	3.04	2.78	3.15	
57	IMG_7335_Huizache_1.JPG	Huizache	T	4.72	4.04	4.79	3.33	3.86	3.70	4.07	
58	IMG_7339_Huizache_2.JPG	Huizache	T	4.51	3.94	4.58	3.40	3.66	3.56	3.94	
59	IMG_7341_Fraxinus_4.JPG	Fraxinus	T	3.28	2.82	3.34	2.40	2.73	2.56	2.86	
60	IMG_7347_Sicomoro_4.JPG	Sicomoro	T	2.25	2.07	2.27	1.86	1.96	1.96	2.06	
61	IMG_7355_Alam0_10.JPG	Álam0	T	3.93	3.42	4.00	3.01	3.23	3.10	3.45	
62	IMG_7358_Sicomoro_5.JPG	Sicomoro	T	2.15	1.90	2.18	1.67	1.75	1.69	1.89	

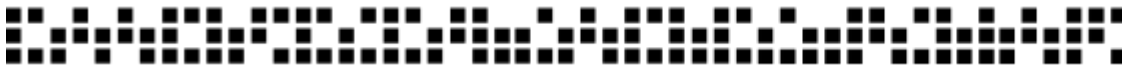


#	Archivo	Nombre común	Lugar	Modelos de Índice de área foliar (Leaf Area Index)						
				Miller (1967)	LiCor LAI2000	Lang (1987)	G. & al. (2018)	N. & C. (1989)	T. & al. (2010)	Promedio
63	IMG_7363_Alamo_11.JPG	Álamo	T	5.23	4.50	5.27	4.67	4.16	4.12	4.66
64	IMG_7366_Alamo_12.JPG	Álamo	T	2.10	1.86	2.12	1.62	1.67	1.67	1.84
65	IMG_7372_Lila_5.JPG	Lila	T	3.26	2.90	3.29	2.62	2.61	2.58	2.88
66	IMG_7373_Lila_6.JPG	Lila	T	3.27	2.81	3.29	2.51	2.62	2.56	2.84
			Min	1.27	1.09	1.27	0.89	0.98	1.00	<b>1.13</b>
			Pro	3.36	2.95	3.37	2.65	2.75	2.67	<b>2.96</b>
			Max	6.54	5.64	6.61	5.13	5.26	5.22	<b>5.67</b>



*Apéndice C. Análisis de índice de área foliar de vegetación arbórea en Ciudad Chihuahua, Chih. México*

Escenario	Altura total (m)	Diámetro (m)	IAF (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	Altura del tronco (m)	Escenario	Altura total (m)	Diámetro (m)	IAF (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	Altura del tronco (m)
1	5	3	1	2	42	15	5	3.5	4
2	5	3	1	3	43	15	9	3.5	2
3	5	3	1	4	44	15	9	3.5	3
4	5	5	1	2	45	15	9	3.5	4
5	5	5	1	3	46	15	3	6	2
6	5	5	1	4	47	15	3	6	3
7	5	9	1	2	48	15	3	6	4
8	5	9	1	3	49	15	5	6	2
9	5	9	1	4	50	15	5	6	3
10	5	3	3.5	2	51	15	5	6	4
11	5	3	3.5	3	52	15	9	6	2
12	5	3	3.5	4	53	15	9	6	3
13	5	5	3.5	2	54	15	9	6	4
14	5	5	3.5	3	55	25	3	1	2
15	5	5	3.5	4	56	25	3	1	3
16	5	9	3.5	2	57	25	3	1	4
17	5	9	3.5	3	58	25	5	1	2
18	5	9	3.5	4	59	25	5	1	3
19	5	3	6	2	60	25	5	1	4
20	5	3	6	3	61	25	9	1	2
21	5	3	6	4	62	25	9	1	3
22	5	5	6	2	63	25	9	1	4
23	5	5	6	3	64	25	3	3.5	2
24	5	5	6	4	65	25	3	3.5	3
25	5	9	6	2	66	25	3	3.5	4



Escenario	Altura total (m)	Diámetro (m)	IAF (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	Altura del tronco (m)	Escenario	Altura total (m)	Diámetro (m)	IAF (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	Altura del tronco (m)
26	5	9	6	3	67	25	5	3.5	2
27	5	9	6	4	68	25	5	3.5	3
28	15	3	1	2	69	25	5	3.5	4
29	15	3	1	3	70	25	9	3.5	2
30	15	3	1	4	71	25	9	3.5	3
31	15	5	1	2	72	25	9	3.5	4
32	15	5	1	3	73	25	3	6	2
33	15	5	1	4	74	25	3	6	3
34	15	9	1	2	75	25	3	6	4
35	15	9	1	3	76	25	5	6	2
36	15	9	1	4	77	25	5	6	3
37	15	3	3.5	2	78	25	5	6	4
38	15	3	3.5	3	79	25	9	6	2
39	15	3	3.5	4	80	25	9	6	3
40	15	5	3.5	2	81	25	9	6	4
41	15	5	3.5	3					