

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA Y SOSTENIBILIDAD**



**LA INFLUENCIA DE LA ARBORIZACIÓN Y DE LA  
PAVIMENTACIÓN EN EL CONFORT TÉRMICO  
URBANO EN LA AVENIDA LEOPOLDO MACHADO,  
MACAPÁ- BRASIL, 2017.**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRA EN  
ARQUITECTURA Y SOSTENIBILIDAD**

**AUTORA: BACHILLER ARQ. ANNELI MARICIELO CÁRDENAS  
CELIS**

**ASESOR INTERNO: DR. PABLO COBEÑAS NIZAMA**

**ASESOR EXTERNO: DR. ODÓN ROMÁN SANCHEZ CCOYLLO**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

*Dedicado a mis padres José Walter Cárdenas Sotil y Anneli Mercedes Celis de Cárdenas por todo el apoyo en todos los momentos de mi vida. A mi hermano André Alonso, por los consejos de perseverancia.*

*A mis asesores, el Dr. Ing. Odón Román Sanchez Ccoyllo y al Dr. Arq. Pablo Cobeñas por su colaboración y dedicación mediante sus conocimientos y consejos. A los jurados, Dr. Arq. Rodolfo Castillo, Dr. Roberto Tarazona, y el Mg. Guisello Villa por su tiempo concedido y colaboración mediante sus observaciones que permitieron que la investigación siga adelante.*

*Mis agradecimientos a la coordinadora Mg Arq. Rita Gondo por todo el apoyo y a esta institución por permitir la realización de mis estudios de postgrado.*

*En fin, gracias a todos que me incentivaron e hicieron posible para que esta investigación sea realizada.*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	4
1.2.1. Formulación del problema .....	4
1.2.2. Justificación del estudio .....	8
1.3. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL TEMA .....	12
1.3.1. Investigaciones relacionadas con el tema .....	19
1.4. OBJETIVO.....	22
1.4.1. Objetivo General:.....	22
1.4.2. Objetivos Específicos: .....	22
1.5. LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	23
<b>2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1. BASES TEÓRICAS RELACIONADAS CON EL TEMA .....	24
2.1.1. El contexto urbano y su relación con el clima .....	24
2.1.2. El confort térmico urbano y sus parámetros climáticos y personales .....	34
2.1.3. La pavimentación urbana y sus influencias en el confort térmico urbano.....	41
2.1.4. Arborización urbana y sus beneficios en el confort térmico urbano .....	46
2.1.5. Perfil Urbano, climático y ambiental de la ciudad de Macapá .....	53
2.1.5.1. Un breve resumen del perfil urbano de la ciudad de Macapá .....	53
2.1.5.2. Caracterización climática de Macapá.....	55
2.1.5.3. Caracterización de la arborización urbana de la ciudad de Macapá .....	61
2.1.5.4. Caracterización y análisis física de la Avenida Leopoldo Machado.....	65
2.2. DEFINICIONES DE TÉRMINOS UTILIZADOS .....	4
2.3. HIPÓTESIS .....	7
2.3.1. Hipótesis General.....	7
2.3.2. Hipótesis Específicas .....	7
2.4. VARIABLES .....	7
2.4.1. Variables relacionadas a los datos observados .....	7
2.4.2. Variables relacionadas a las simulaciones numéricas.....	8
<b>3. CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>9</b>
3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	9
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	10
3.2.1. Diseño muestral .....	10
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS .....	11
3.3.1. Técnicas .....	11

3.3.2.	Instrumentos.....	12
3.4.	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	17
<b>4.</b>	<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
4.1.	RESULTADOS.....	19
4.1.1.	Mediciones de campo.....	19
4.1.1.1.	Resultados de la temperatura superficial del suelo.....	20
4.1.1.2.	Resultados de la temperatura del aire.....	24
4.1.1.3.	Resultados de la humedad relativa del aire.....	25
4.1.1.4.	Resultados de la velocidad del viento.....	27
4.1.2.	Simulaciones numéricas con el software ENVI-met.....	28
4.1.2.1.	Archivo de configuración.....	28
4.1.2.2.	Configuración de la altura de las casas y edificios.....	33
4.1.2.3.	Configuración del dominio del modelo.....	35
4.1.2.4.	Confirmando el área del modelo.....	38
4.1.2.5.	Configuración del tipo de suelo.....	40
4.1.2.6.	Configuración del tipo de vegetación.....	42
4.1.2.7.	Ejecución del Modelo.....	46
4.1.2.8.	Modelos.....	47
4.1.2.9.	Configuración del Índice de Confort PMV.....	52
4.1.2.10.	Configuración del Índice de Disconfort PPD.....	59
4.1.2.11.	Resultados del Índice de Confort Térmico –PMV.....	60
4.1.2.12.	Resultados del Índice de Disconfort Térmico – PPD.....	76
4.1.2.13.	Resultados de la temperatura del suelo en las simulaciones numéricas del ENVI-met	81
4.1.2.14.	Resultados de la humedad relativa en las simulaciones del ENVI-met.....	86
4.1.2.15.	Resultados de la velocidad del viento en las simulaciones del ENVI-met.....	90
4.1.2.16.	Resultados de la temperatura del aire en las simulaciones del ENVI-met.....	93
4.2.	ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	98
4.2.1.	Influencia de la pavimentación en el confort térmico urbano.....	98
4.2.2.	Influencia de densidad de arborización en la temperatura del aire.....	99
4.2.3.	Influencia de densidad de la arborización en la humedad relativa del aire.....	100
4.2.4.	Influencia de la densidad de arborización en la velocidad del viento.....	102
4.2.5.	Influencia de la densidad de arborización en el índice de confort – PMV.....	103
4.2.6.	Influencia de la densidad de arborización en el índice de disconfort – PPD.....	104
4.2.7.	Influencia de la densidad arbórea en la temperatura del suelo – ENVI-met 4.0 ..	105
4.2.8.	Influencia de la densidad arbórea en la humedad relativa- ENVI-met 4.0.....	106
4.2.9.	Influencia de la densidad arbórea en la velocidad del viento – ENVI-met 4.0 ....	107
<b>5.</b>	<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>110</b>
5.1.	CONCLUSIONES.....	110

5.2. RECOMENDACIONES .....	112
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>119</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Clasificación climática de la ciudad de Macapá, según las metodologías.....	8
Tabla 03: Clasificaciones climáticas y espacios urbanos.....	26
Tabla 04: Escalas de sensación térmica.....	39
Tabla 05 – Análisis de los materiales urbanos desarrollados por el hombre.....	44
Tabla 06 - Propiedades termo radiante de la pavimentación.....	45
Tabla 07: Variaciones de temperatura en espacios abiertos de acuerdo al agrupamiento de arborización.....	52
Tabla 08: Registros climatológicos de 1981-2010.....	57
Tabla 09: Velocidad del viento y temperatura media del aire de Macapá.....	60
Tabla 10: Frecuencia relativa de la especie Mangifera indica L. en la ciudad de Macapá..	61
Tabla 11: Características físicas del mango.....	64
Tabla 12: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	65
Tabla 13: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	92
Tabla 14: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	93
Tabla 15: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	94
Tabla 16: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	98
Tabla 17: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá.....	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Localización de la ciudad de Macapá – Brasil. Fuente: IBGE, 2018.....	6
.....	7
Figura 02: Diseño urbano Av. Leopoldo Machado. Fuente: Michael, (2014).....	7
Figura 03: Clasificación climática de Macapá según la NBR- 15220-3.....	9
Figura 04: Porcentaje de área verde por m <sup>2</sup> . Fuente: OMS, 2012. ....	10
Figura 05: Isla de calor urbana y sus diferencias de temperaturas .....	28
Figura 06: La influencia del calor antropogénico en el clima urbano .....	29
Figura 07: Factores climáticos globales.....	30
Figura 08: Factores climáticos locales.....	31
Figura 09: Elementos climáticos.....	31
Figura 10: Variables morfológicas que pueden modificar las características climáticas dentro del contexto urbano.....	33
Figura 11: La fisiología humana y sus cambios térmicos.....	35
Figura 12: Condiciones a ser analizadas para llegar al confort térmico .....	36
Figura 13: Estrategias de confort térmico según la NBR 15220. ....	38
Figura 14: Porcentaje de PMV/PPD. Fuente: ASHRAE, 2005. ....	40
Figura 15: Capacidad térmica de los materiales del entorno .....	42
Figura 16: Absorción, reflexión y emisión de radiación en un recinto urbano.....	43
Figura 17: La influencia de los materiales en la temperatura del aire .....	45
Figura 18: Importancia de la vegetación al crear caminos sombreados .....	48
Figura 19: Efecto térmico producido por la sombra de un árbol .....	49
Figura 20: Propiedades termo- físicas de los materiales urbanos vs arborización y sus diferencias de temperatura.....	50
Figura 21: Los beneficios de la arborización urbana .....	51
Figura 22: Beneficios de la arborización urbana en las ciudades .....	52
Figura 23: Evolución de los porcentuales en la región norte, Amapá y Brasil.....	54
Figura 24: Amapá y la ZCIT.....	56
Figura 25: Temperaturas y zona de confort de la ciudad de Macapá .....	58
Figura 26: Porcentajes de humedad relativa en la ciudad de Macapá .....	59
Figura 27: Dirección de los vientos de la ciudad de Macapá .....	60
Figura 28: Macapenses reclaman de los prejuicios ocasionados por la queda de mango.....	63
Figura 31: Puntos de intensidad de arborización urbana – Av. Leopoldo Machado .....	1
Figura 32: Punto n°1, sin presencia de arborización - Av. Leopoldo Machado .....	2
Figura 33: Punto n° 2, con regular arborización – Av. Leopoldo Machado .....	3
Figura 34: Punto n°3 con abundante arborización – Av. Leopoldo Machado .....	4
Figura 35: Disposición, densidad y clasificación de arborización.....	10
Figura 36: Anemómetro – HM-383 .....	13
Figura 37: Termo Higrómetro del Modelo HT – 4000.....	13
Figura 38: Termómetro Infrarrojo HT-817.....	14
Figura 39: Factores analizados por el ENVI-met. 4.0 .....	16

Figura 40: Proceso de modelaje en el software ENVI-met.....	16
Figura 41: Puntos de medición- Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.....	20
Figura 42: Temperatura de la superficie del suelo en el punto P1 - sin arborización. Fuente: La autora, 2017.....	21
Figura 43: Temperatura de la superficie del suelo – regular arborización. Fuente: La autora, 2017.....	23
Figura 44: Temperatura de la superficie del suelo – abundante arborización ..... Fuente: La autora, 2017. ....	24
Figura 45: Editor ConfigWizard. Fuente: ENVI-met 2017 .....	28
Figura 46: Ventana ConfigWizard con las opciones de configuración a ser completadas. Fuente: La autora, 2017. ....	29
Figura 47: Valores de las alturas de casas y edificios del área del modelo en el ENVI-met.....	34
Figura 48: Configuración inicial del dominio del modelo.....	37
Figura 49: Análisis del modelo con el Model Inspector del ENVI-Met.....	38
Figura 50: Actualización del número de puntos alrededor de la malla.....	39
Figura 51: Análisis satisfactorio del modelo con el Model Inspector del ENVI-met.....	40
Figura 52: Tipos de suelos en el ambiente SPACES del ENVI-met. ....	41
Figura 53: Descripción del tipo de suelo en el ENVI-met para el área de estudio .....	42
Figura 54: Tipos de vegetación en ambiente SPACES del ENVI-met.....	43
Figura 55: Ambiente Albero para la configuración del árbol.....	44
Figura 56: Vista tri-dimensional en el ambiente Albero del ENVI-Met .....	45
Figura 57: Ejecución de la simulación numérica en el ENVI-met 4.0. ....	47
Figura 58: Visualización 3D del modelo sin arborización (SA) en el ENVI-met. ....	49
Figura 59: Visualización 3D del modelo con arborización original (AO) en el ENVI-met. ....	51
Figura 60: Visualización 3D del modelo con arborización total (AO) en el ENVI-met .....	52
Figura 61: Configuración de la carpeta con los datos meteorológicos, período temporal y nivel vertical para el cálculo del PMV.....	55
Figura 62: Parámetros personales del cuerpo, ropa y metabolismo en el BioMet.....	57
Figura 63: Herramienta Leonardo para imprimir gráficos y tablas de las simulaciones numéricas del ENVI-met.....	58
Figura 64: Porcentaje de personas insatisfechas con el ambiente térmico (PPD) en función del voto medio estimado (PMV).....	59
Figura 65: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo SA.....	61
Figura 66: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo AO.....	62
Figura 67: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo CA.....	63
Figura 68: Índice de confort PMV en el receptor R1 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA).....	65
Figura 69: Índice de confort PMV en el receptor R2 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA).....	66

Figura 70: Índice de confort PMV en el receptor R3 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA).....	67
Figura 71: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo SA.....	68
Figura 72: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo AO.....	69
Figura 73: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo CA.....	70
Figura 74: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos SA y AO....	71
Figura 75: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos SA y CA. ...	72
Figura 76: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos AO y CV. ..	73
Figura 77: Índice de confort medido a las 09:00 horas en el modelo SA.....	74
Figura 78: Índice de confort medido a las 15:00 horas en el modelo SA.....	75
Figura 79: Diferencias del Índice de confort medido a las 15:00 entre los modelos SA y CV ....	76
Figura 80: Valores PPD (%) en el receptor R1 para los modelos SA, AO y CA .....	77
Figura 81: Valores PPD (%) en el receptor R1 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.....	78
Figura 82: Valores PPD (%) en el receptor R2 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.....	80
Figura 83: Valores PPD (%) en el receptor R3 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.....	81
Figura 84: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1 .....	82
Figura 85: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1. Fuente: La autora, 2017. ....	83
Figura 86: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R3 .....	85
Figura 87: Diferencia de temperatura del suelo entre los modelos SA y CA.....	86
Figura 88: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R1 .....	87
Figura 89: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R2.....	88
Figura 90: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R3.....	89
Figura 91: Diferencia en la humedad relativa entre los modelos SA y CA .....	90
Figura 92: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R1.....	91
Figura 93: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R2.....	92
Figura 94: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R3.....	93
Figura 95: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R1 .....	94
Figura 96: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R2.....	95
Figura 97: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R3.....	96
Figura 98: Diferencia en la temperatura del aire entre los modelos SA y CA.....	97
Figura 99: Mapa infográfico de los resultados encontrados en el escenario real vs simulado. Fuente: La autora, 2017 .....	109
Figura 100: Muertes por año relacionados con el calor.....	112
Figura 101: Propuesta corredor verde en la Av. Leopoldo Machado.....	113
Figura 102: Morfología urbana rediseñada.....	114
Figura 103: Propuesta de mayor densidad arbórea en la vía urbana.....	114
Figura 104: Mejor calidad de vida en la vía urbana.....	115

## **RESUMEN**

Esta investigación trata de la influencia de la arborización urbana y de la pavimentación en el confort térmico urbano de la Avenida Leopoldo Machado, en la ciudad de Macapá- Amapá, Brasil, 2017. La ciudad de Macapá es caracterizada por poseer un clima tropical húmedo, ya que está localizada en la región norte de Brasil donde prácticamente hay la presencia de sol todo el año por estar en la Línea del Ecuador. El principal objetivo de este trabajo es contribuir con espacios urbanos abiertos más confortables climáticamente mediante la arborización y pavimentación. Para eso, se discute el microclima que es generado en la vía pública, a partir de tres puntos de medición: alta densidad de arborización, regular y sin presencia de arborización. Fueron realizados mediciones con instrumentos meteorológicos portátiles y simulaciones numéricas mediante el uso de la herramienta computacional ENVI-met 4.0. Mediante el análisis de las variables climáticas analizadas, se constató que la pavimentación y la densidad de arborización tienen un papel muy importante para las ciudades en el aspecto climático, ya que ameniza el calor y mejoran el confort térmico urbano, creando microclimas diferenciados. Como conclusión, esta investigación demuestra que la vía pública posee microclimas diferenciados de acuerdo con la cantidad y conformación de la arborización, así como también por la influencia de los materiales urbanos presentes en la pavimentación. Son presentadas recomendaciones para proporcionar un mayor confort térmico urbano, como espacios más arborizados y un mejor diseño de la vía pública para que los transeúntes puedan desplazarse con más comodidad.

Palabras claves: Microclima, Arborización, Pavimentación, Confort térmico urbano.

# ABSTRACT

This research deals with the influence of urban afforestation and paving in the urban thermal comfort of the avenue Leopoldo Machado, in the city of Macapá - AP, Brazil 2017. The city of Macapá is characterized by possessing a humid tropical climate since it's located in the north region of Brazil where it practically has sun all year for being in the Ecuador line. The main objective of this work is to contribute to an open and more climatically comfortable urban space by means of afforestation and paving. For this, the microclimate that is generated in the public road, from three measurement handles is discussed: High density of afforestation, regular and without the presence of afforestation. Measurements were made using portable meteorological instruments and numerical simulations using the ENVI-met 4.0 computational tool. Through the analysis of the climatic variables collected, it was found that the paving and the density of the afforestation have a very important role for the cities in the climatic aspect since it softens the heat and improves the urban thermal comfort, creating different microclimates. As conclusion, this research demonstrates that the public road has differentiated microclimates according to the amount and distribution of the afforestation, as well as the influence of the present urban materials. Recommendations are presented to provide greater urban thermal comfort, such as more wooded spaces and a better layout of the public highway so that passers-by can move with more convenience.

Key words: Microclimate, Afforestation, Paving, Urban thermal comfort

# **1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

## **1.1. Introducción**

Actualmente en el Brasil, más del 80% de la población reside en ciudades, de acuerdo con los datos del Instituto Brasileño de Estadística (IBGE, 2010). Los efectos del incremento de la urbanización, el aumento de la población urbana y sus diversas actividades están transformando drásticamente el ambiente natural y el ambiente construido.

El nivel de urbanización mundial está previsto en aumentar de 52% en 2011 para 67% en 2050, correspondiendo a un aumento de 2.6 billones de personas, esto significa que en 2050 probablemente apenas la población urbana mundial será del mismo tamaño que la población total mundial contabilizada en el año de 2002 (NACIONES UNIDAS, 2012).

La aglomeración urbana viene causando innúmeros impactos en las ciudades, factores como el aumento de tráfico de vehículos y su consecuente emisión de contaminantes, la supresión de la vegetación nativa, alteración en la topografía, exceso de pavimentación del suelo, alteran el microclima aumentando el discomfort en el ambiente urbano (DOBBERT, 2015).

Las ciudades son un gran modificador del clima local, debido a las grandes áreas pavimentadas y disminución de áreas verdes, no ofreciendo condiciones de confort favorables al ambiente urbano, alterando la temperatura y el régimen de lluvias de la región (GONÇALVES, CAMARGO & SOARES, 2012).

Rogers (2001), menciona que en cuanto no haya una disminución en el ritmo de las aglomeraciones urbanas, el simple factor de vivir en ciudades no debería conducir a la auto

destrucción de la civilización, por lo tanto, se debe buscar estrategias adecuadas para la mitigación de los problemas urbanos y del clima urbano.

El microclima juega un rol importante en las ciudades, ya que es fundamental ofrecer condiciones térmicas compatibles al confort térmico humano, sean cuales sean las condiciones climáticas externas. Las estrategias bioclimáticas son importantes para proporcionar bienestar a los usuarios y consecuentemente una ciudad más saludable.

Para estabilizar los efectos del microclima, el uso de la arborización urbana es una de las estrategias bioclimáticas más eficientes, proporcionando el control de radiación solar, de humidificación y depuración del aire, además de efectos positivos de las sombras de los árboles en la performance de la pavimentación, trayendo beneficios para la calidad del ambiente construido, sean espacios abiertos o cerrados.

Para Lima, Nunes, & Soares (2006), la arborización urbana tiene efectos positivos en las ciudades, y son de grande importancia en el espacio urbano, siendo tema de interes por parte de los investigadores y la población, ya que permiten reducir el consumo de energia y minimizar los efectos de islas de calor.

La formación de estas islas están relacionadas a la impermeabilización del suelo, elevada concentración de contaminantes, falta de humedad en los ambientes, a los materiales empleados y principalmente por la falta de preocupación y cuidado con áreas arborizadas (BUENO, 1988).

En regiones tropicales, como es el caso de la ciudad de Macapá, donde las elevadas temperaturas son predominantes el año todo, es necesaria la implementación de medidas que permitan alcanzar el confort térmico urbano. De tal manera, relacionar la idea de confort térmico

a la sombra de los arboles es una iniciativa bastante positiva, principalmente en ciudades con esas características climáticas.

Locales que proporcionen sombra son los más buscados entre los usuarios, sin embargo, el crecimiento urbano y los cambios en la morfología de la ciudad, ocasionaron alteraciones en el diseño urbano, disminuyendo la presencia de áreas arborizadas y creando superficies con temperaturas elevadas.

Por tanto, la ausencia de vegetación aliada al uso de materiales con mayores coeficientes de absorción, como es el caso de la pavimentación, hace con que los espacios abiertos y construidos sean menos confortables térmicamente (SILVA, 2009).

En este sentido, la presente investigación busca analizar la influencia de la arborización y la pavimentación en la Avenida principal Leopoldo Machado de la ciudad de Macapá-Brasil, mediante mediciones de variables climáticas, entendiendo el comportamiento de esos componentes en el confort térmico urbano.

Los procedimientos metodológicos de la investigación se dividieron en dos fases: La primera fase corresponde a la medición de las variables micro climáticas del escenario real, tal como se presenta: como temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura superficial del suelo, realizados en tres puntos diferentes del área de estudio. La segunda fase corresponde al uso de la simulación computacional que permitió crear escenarios hipotéticos en la avenida Leopoldo Machado, permitiendo hacer el comparativo entre áreas con diferente densidad de arborización.

La simulación computacional, con uso del software ENVI-met, permitió el análisis micro climático de las interacciones entre casas, edificios, superficies del suelo y vegetación. El uso de

la simulación micro climática puede ser empleada como un método de investigación por su facilidad de empleo en situaciones tanto reales cuanto hipotéticas, para la comprensión de los fenómenos relacionados al clima urbano y evaluar las estrategias de mitigación y adaptación antes de su implementación (SILVA, 2018).

Es así como el presente trabajo desarrolla el conocimiento de la influencia de la arborización y pavimentación, aliado a los mecanismos de cambios de calor y del comportamiento térmico de los materiales utilizados. Proporcionando una mejor participación de la arquitectura, incorporando datos relativos al medio ambiente externo, permitiendo aprovechar lo que el clima presenta de agradable y amenizar sus aspectos negativos (FROTA & SCHIFFER, 2003).

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

### **1.2.1. Formulación del problema**

En pleno siglo XXI, la sociedad moderna busca atender sus propias necesidades de consumo de su población, transformando el paisaje natural en artificial por medio de las acciones humanas (SANTOS, 2008). Son perceptibles los efectos negativos de la creciente urbanización y son fácilmente identificados en la morfología urbana.

Muchos de los problemas están relacionados al diseño de las calles, ya que tienen fundamental importancia para el urbanismo bioclimático, una vez que las calles son espacios de articulación entre las edificaciones y la camada intraurbana (OSAKU, 2014). Por lo tanto, la calidad del espacio urbano repercute directamente al confort térmico urbano, sean en espacios abiertos, como espacios internos de las edificaciones.

En los centros urbanos donde el planeamiento urbano es adecuado, la arborización urbana es responsable entre otros aspectos por la mejoría del confort térmico urbano, especialmente en climas con elevadas temperaturas. La arborización actúa en la reducción de la temperatura, contribuyendo para la estabilidad emocional, confort psicológico, además de proporcionar ambientes para descanso.

Sin embargo, ese escenario urbano puede presentar condiciones de habitabilidad no siempre satisfactorias, como es el caso de la ciudad de Macapá. La ciudad presenta un clima ecuatorial húmedo y recibe durante todo el año una gran cantidad de energía solar, proporcionando un clima caliente y húmedo, caracterizándose por seis meses lluviosos y otros seis meses sin lluvia, siempre con temperaturas elevadas.

Las temperaturas medias mensuales son divididas en tres grupos: las temperaturas máximas, medias y mínimas. Las máximas temperaturas varían entre 31°C y 33°C, llegando algunas veces hasta los 40°C, entre los meses de agosto y octubre. Las temperaturas medias más bajas generalmente ocurren en el mes de marzo variando entre 25°C y 26°C. La temperatura máxima media del mes más caliente ocurre en octubre, ateniendo 32.6°C, en cuanto la temperatura mínima media del mes más frío ocurre en julio ateniendo 22.9°C (TAVARES, 2014).

Macapá, capital del estado de Amapá se localiza al extremo norte de Brasil, es considerada ciudad amazónica, y tiene su costa bañada por el Rio Amazonas (Figura 01). Es conocida como ciudad del medio del mundo por ser cortada por la Línea del Ecuador, tiene una población estimada en 829.494 mil habitantes, siendo la 53ª ciudad más populosa de Brasil y la 5ª de la región norte y el número de habitantes de la población urbana continúa creciendo en los últimos años, de acuerdo el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE,2018).



Figura 01: Localización de la ciudad de Macapá – Brasil. Fuente: IBGE, 2018.

Referente a su morfología, la ciudad de Macapá al largo de los años viene siendo transformada de acuerdo con las necesidades económicas de la región y del proceso de urbanización acelerada. El aparecimiento de nuevas edificaciones surge para transformar el paisaje urbano, causando impactos en el medio ambiente y consecuentemente en el confort térmico urbano.

En la avenida Leopoldo Machado, objeto de estudio, se pudo constatar que la arborización urbana no es constante en todo su tramo, así como no es siempre adecuada la pavimentación, imposibilitando que las personas caminen con el debido confort térmico (Figura 02).



Figura 02: Diseño urbano Av. Leopoldo Machado. Fuente: Michael, (2014).

Según MACEDO (2010), avenidas y veredas son elementos de la infraestructura urbana que componen el sistema viario urbano y deben garantizar el tránsito de personas. Para Tostes (2017), la reducción de áreas verdes en la ciudad de Macapá están relacionados a los investimentos en los últimos treinta años. El trazado urbano después de la implementación del Territorio Federal de Amapá también contribuyó para acelerar la pérdida de la vegetación, donde la vegetación nativa dio lugar a construcciones, calles y vías, sin ningún tipo de preservación o manutención.

Mediante a lo expuesto, se tiene el siguiente problema general:

¿La arborización y pavimentación influyen en el confort térmico urbano en la Avenida Leopoldo Machado, 2017?

Los problemas secundarios:

- ¿El tipo de material utilizado en la pavimentación influye en la temperatura del suelo?
- ¿La densidad de arborización urbana influye en la temperatura del aire, humedad relativa del aire y velocidad del aire?

- ¿La densidad de arborización urbana influye en los índices de confort térmico (PMV)?
- ¿La densidad de arborización urbana influye en los índices de desconfort térmico (PPD)?

### **1.2.2. Justificación del estudio**

Para obtener un espacio confortable es fundamental entender el comportamiento climático y el contexto en el cual está inserido en la morfología urbana. Las condiciones climáticas del local contribuyen para la determinación del confort, una vez que la temperatura y humedad del aire, así como la radiación y el viento, se comportan de manera diferenciada, variando de local para local.

Estos condicionantes son afectados, principalmente por el volumen de la masa construida, por la contaminación atmosférica, por las alteraciones de las superficies que aumentan la temperatura del aire, por la impermeabilización del suelo y por la escasez de vegetación y agua (SILVA, 2009).

De acuerdo con Tavares (2014), las temperaturas en Macapá siempre son elevadas (nunca menores que 21°C), de acuerdo con algunas metodologías como Köppen o Strahler, la clasificación climática de la ciudad es considerada como clima ecuatorial húmedo. (Tabla 01).

Según la Norma Técnica Brasileña (NBR 15220-3), que trata de los procedimientos para evaluación del desempeño térmico de las edificaciones de acuerdo con las ocho zonas bioclimáticas del Brasil, la ciudad de Macapá corresponde a la zona bioclimática 08, la misma tiene como característica un clima caliente y húmedo, ocupando 53.7% del Brasil, englobando la región amazónica y el litoral del nordeste (Figura 03).

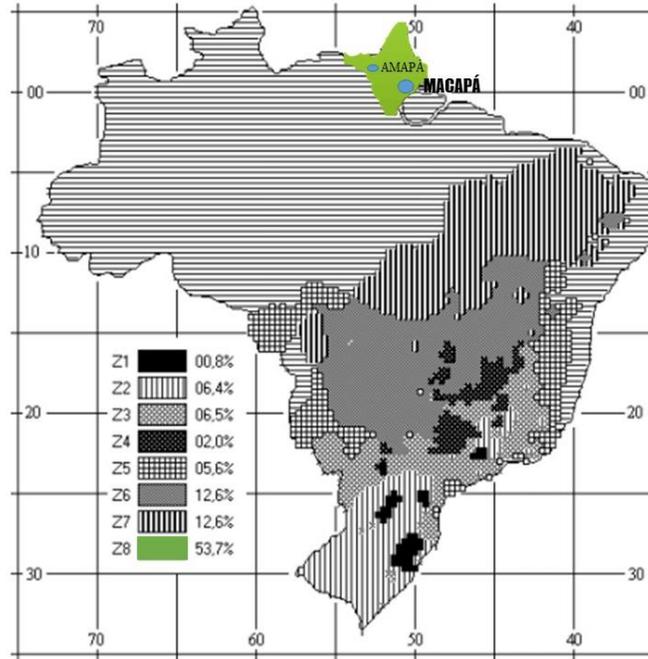


Figura 03: Clasificación climática de Macapá según la NBR- 15220-3

Tabla 01: Clasificación climática de la ciudad de Macapá, según las metodologías. Fuente: Tavares, 2014.

Clasificación climática	Referencia
Megatérmico Húmedo con curta estación seca	Köppen
Ecuatorial Húmedo	Strahler
Húmedo B3	Thorntwaite

En climas de esas características, la arborización y los materiales apropiados en la pavimentación contribuyen de manera significativa para estabilizar los efectos del clima, teniendo un amplio significado social, cultural y científico para la ciudad y consecuentemente para los transeúntes de la avenida Leopoldo Machado que no obtienen el debido confort térmico urbano.

Además, la Organización Mundial de Salud (OMS), propone que las ciudades tengan un mínimo de 9 metros cuadrados y de 16 metros cuadrados de área verde por habitante como padrón ideal (Figura 04), pues la presencia de arborización en el paisaje urbano eleva la categoría de una ciudad, beneficiándola en los aspectos políticos, sociales y económicos (LIRA, 2001).

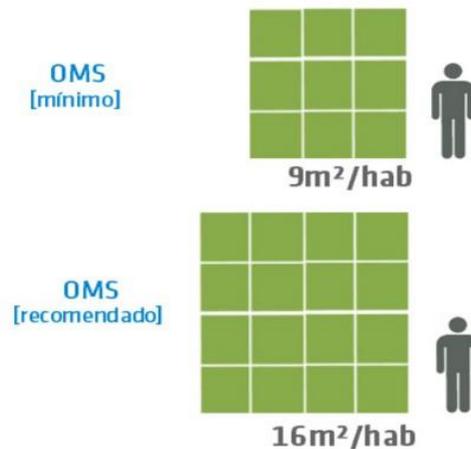


Figura 04: Porcentaje de área verde por m<sup>2</sup>. Fuente: OMS, 2012.

Por lo tanto, se torna necesario buscar estrategias bioclimáticas para solucionar o amenizar la falta de confort térmico urbano en las ciudades, especialmente en las ciudades de elevadas temperaturas, como es el caso de la ciudad de Macapá, y así ofrecer condiciones térmicas adecuadas para que el transeúnte pueda disfrutar de esos espacios.

Para Gehl (2015), la experiencia del confort y bienestar en las ciudades están conectadas al modo de estructura urbana y al espacio de la ciudad al armonizarse con el cuerpo humano, sus sentidos, dimensiones espaciales y escalas correspondientes, si no hay buenos espacios y buenas escalas humanas no existirán las cualidades urbanas cruciales.

La arborización urbana pasa a ser vista en las ciudades como un importante elemento natural restructurador del espacio urbano, ya que aproxima las condiciones ambientales normales de

relación con el medio urbano. Además, las ciudades están cada vez más considerando la arborización como una herramienta de combate a los cambios climáticos, o sea el bienestar de los árboles nunca ha sido tan importante.

Macapá actualmente cuenta con la reciente elaboración de directrices de un Plano de Arborización Urbana del Municipio de Macapá – PDAU/ MCP, donde constituyen objetivos con la base propuesta contenida en el parágrafo único del Art.56, de la Ley Municipal, N.º 026 de 20 de enero de 2004. Las alteraciones son las siguientes:

- I. Buscar el confort ambiental en el Municipio de Macapá, de manera a mantener el equilibrio climático y combatir las islas de calor;
- II. Rellenar el vacío arbóreo del Municipio de Macapá, visando la estandarización de la arborización urbana;
- III. Establecer las directrices del planeamiento, diagnóstico, implantación y manejo permanentes de la arborización de los espacios públicos en el tejido urbano;
- IV. Monitorear la cantidad, calidad, accesibilidad, oferta y distribución de espacios libres y áreas verdes en el tejido urbano;
- V. Utilizar la arborización en la rehabilitación de los espacios urbanos y contribuir para el proceso de resiliencia ambiental en el Municipio de Macapá;
- VI. Transformar la arborización en instrumento de desenvolvimiento urbano;
- VII. Ayudar en el control ambiental de la ciudad, por medio de registro georreferenciado;
- VIII. Integrar y envolver la sociedad, con vistas a la manutención y la conservación de la arborización urbana.

Los pocos estudios realizados sobre el confort térmico urbano a través de la conformación de la arborización urbana y pavimentación en las vías públicas de la ciudad de Macapá, justifica

el desarrollo de esta investigación, una vez que los resultados pueden servir para subsidiar planos de interés público, adaptada a la infraestructura y las condiciones micro climáticas de la ciudad, contribuyendo para un diseño climatológicamente orientado.

### **1.3. Antecedentes relacionados con el tema**

El concepto de “confort” ha venido variando a lo largo de la historia, de manera que ha tenido distinto significado en diversos periodos. Tal es así, que fue sinónimo de “confortar” debido a su raíz latina confortare, en el siglo XVII fue vinculado con lo privado, “lo doméstico”, la intimidad y en el siglo XVIII se le empieza a relacionar con el ocio y la comodidad (MARTINEZ, 2011). Durante el siglo XIX se le asocia con la ventilación, la luz, el calor y con los temas higienistas, pero es recién en el siglo XX cuando se comienza a trabajar para lograr la eficiencia del confort y la comodidad (BRAVO & TORRE, 2014).

En el siglo XXI empezaron las observaciones meteorológicas realizadas por instrumentación, posibilitando la obtención de series de mediciones regulares y sistemáticas, y permitiendo detectar en algunas ciudades, las alteraciones en el clima generadas por el crecimiento urbano (SILVA 2012).

Entretanto, la primera referencia sobre el clima urbano remite a la sociedad griega y romana. Hipócrates en su obra intitulada “Aire, Agua y Local” desarrolló algunos conceptos sobre los efectos del medio ambiente urbano sobre la salud de los habitantes (GARCÍA, 1999).

Referente a la presencia de árboles en las ciudades, se sabe que siempre estuvo presente en la historia de la humanidad desde los inicios de la civilización, sin embargo, la arborización adquirió importancia para los habitantes solamente en los inicios de siglos XVIII, en Europa.

Para Franco (1997), la introducción de árboles en las ciudades europeas, ocurridas en el periodo clásico barroco, se debe a un cambio en el modo de pensar y vivir de la época. Por ejemplo, Ebenezer Howard hizo el proyecto de ciudad jardín para originar un cambio en el concepto de calidad ambiental urbana.

Los primeros estudios sobre el clima urbano tienen como inicio el siglo XIX en Europa. Unos de los primeros trabajos publicados, se refiere al clima de Londres, observando las diferencias de temperatura entre la ciudad y el medio rural, estudiadas por Luke Howard en 1818 (PEZZUTO, 2007).

Fueron sobresalientes en ese periodo los estudios de Landsberg (1956) y Chandler (1965) para la ciudad de Londres. El primer estudio comparó el centro urbano de Londres con las áreas en su entorno, donde se observó medias térmicas anuales superiores en la ciudad. El segundo estudio referente a la monitorización de las islas de calor urbano, donde encontró diferencias de hasta 2° C en el área central en el verano, en relación con su entorno (ASSIS, 2010).

Especialmente en países como Alemania y Austria durante los años 1930 iniciaron la colecta de datos de redes estandarizadas, para el uso en micrometeorología. Su enfoque era en pequeñas escalas de espacios y de tiempo, a partir de la introducción de la técnica de transeptos móviles por Schmidt, en 1927 (Oke, 1984a).

En la época de la segunda grande guerra, América del Norte y el Japón ya estaban envueltos con trabajos similares. Después de la guerra, ocurrió un interés renovado sobre el tema y muchos trabajos fueron realizados en estos países, concentrándose en la distribución horizontal de varios elementos climáticos, siendo la temperatura la variable dominante (ASSIS, 2005).

En el final de los años de 1960 y inicio de 1970, ocurrió un fuerte y súbito aumento del número de trabajos sobre la atmosfera urbana, originados probablemente por la mayor conciencia del papel del ser humano en el cambio ambiental, especialmente sobre la contaminación del aire (Oke, 1984a).

Diversos estudios sobre islas de calor también fueron desarrollados en el transcurrir del siglo XX. A medida que los estudios sobre el clima urbano fueron avanzando, quedó demostrado el carácter fundamental de ciudad como un local de una continua, cumulativa y acentuada descripción antropométrica del ambiente (Mascaró & Mascaró, 2004).

Hubo un gran enfoque en estudios de procesos atmosféricos y en la construcción de modelos, a partir de la contribución de meteorólogos. Paralelamente, se desenvolvía una nueva climatología física en el exterior, donde los conceptos de equilibrio energético e hidrológico se convirtieron en temas centrales. El gran número de trabajos producidos en este periodo llevo a la Organización Mundial de Meteorología (WMO) a patrocinar una serie de revisiones sobre el tema.

Los estudios de climatología urbana en los trópicos todavía son muy limitados, si comparados en latitudes medias. Para tentar promover la investigación sobre el tema en áreas tropicales y mejorar la base del conocimiento para la toma de decisiones en planeamiento y proyectos urbanos, la WMO lanzó en 1993, el Experimento en Clima Tropical Urbano (Truce Tropical Urban Climate Experiment). Sin embargo, debido a restricciones presupuestales de la organización, el programa se quedó limitado a investigar cuestiones específicas indicadas por especialistas (WMO, 1998).

En el año de 2009, Hamada & Ohta (2010), investigaron la diferencia de la temperatura del aire en área urbana, área de pastaje y área de florestas en la ciudad de Nagoya – Japón. Las mayores

diferencias de temperaturas observadas ocurrieron durante el día en el verano (1.9°C), en los meses de junio, agosto y las menores durante la noche en el invierno (0.3°C). Durante la noche, el efecto de refrigeración del área verde avanzó entre 200 y 300 metros en dirección al área urbana, en cuanto durante el día el efecto ultrapaso los 300 metros, destacando la importancia de áreas verdes.

Susca, Gaffin, & Dell'Osso (2011), estudiaron los efectos positivos de la vegetación con un abordaje en dos escalas: escala urbana y de edificio. Los investigadores en la escala urbana acompañaron el comportamiento de las islas de calor en cuatro puntos de la ciudad de Nueva York, donde encontraron en media, 2 grados centígrados de diferencia en la temperatura entre los locales más arborizados y los más densificados. En la escala micro, fue evaluado el efecto del albedo de las superficies sobre el clima mediante la utilización de un modelo climatológico.

En Argentina, Correa et al. (2012) investigaron el confort proporcionado por corredores verdes urbanos de 16m, 20m, y 30 m de largura en el área metropolitana de la ciudad de Mendoza. Esta ciudad de acuerdo con la evaluación sufre con disconfort térmico en 62% del tiempo. La metodología del estudio tuvo como análisis selección de casos, observación experimental y la evaluación de la condición del confort térmico mediante la aplicación del método COMFA, que consiste en un método objetivo para medir el nivel de confort.

Chow & Brazel (2012) estudiaron alternativas, mediante métodos sustentables, la isla de calor urbano en el área metropolitana de Phoenix en los Estados Unidos. En este estudio, fue utilizado un modelo en el software ENVI-met de simulación del clima urbano en microescala para generar escenarios en dos áreas residenciales, con diferentes coberturas vegetales. Posteriormente, fueron analizados los impactos en temperaturas próximas de la superficie y el confort térmico al aire libre en escalas espacial y temporal.

SANTOS et al. (2004) hicieron la aplicación del ENVI-met para la verificación de la vegetación en tres situaciones distintas. La metodología se dio de la siguiente manera, fueron observadas la situación real y la situación hipotética con ausencia de vegetación, así como con vegetación presente. La conclusión de la investigación ha sido que la vegetación que está presente en las vías, contribuyen con la calidad de aire y en la dispersión del dióxido de carbono.

Hong et al. (2012) investigaron el efecto de la vegetación en el clima de un área residencial de Pequín- China, mediante mediciones in loco y simulación numérica. Los estudios demostraron que la vegetación redujo la velocidad del viento en un 46% y que las simulaciones sirvieron para ajustar la disposición y los tipos de vegetación para reducir la velocidad del viento cuando excesivamente alta. El estudio no midió diferencias de temperatura, entretanto confirma un importante efecto de la arborización urbana en el confort ambiental y reducción del viento.

Millward et al. (2014) analizaron como la vegetación urbana puede atenuar los aumentos de temperatura del aire en verano, reduciendo el ganancia solar recibido por edificios en Toronto, en Canadá. Durante un periodo de alta intensidad solar, fueron observadas una diferencia de 11. 7° C entre 10 y 12 horas de temperaturas más frías en las superficies construidas, siendo el mayor beneficio observado al final de tarde.

En Reino Unido, Armson et al. (2014) analizaron el papel de los árboles y del césped en la reducción de las temperaturas regionales y locales durante el verano dentro del paisaje urbano de Manchester. Para esto fueron medidas las temperaturas de superficie de pequeñas parcelas compuestas de concreto y césped, en la presencia y ausencia de sombra arbórea. Los investigadores observaron que la temperatura de la superficie fue afectada tanto por el material cuanto por la presencia de sombra. La vegetación redujo las temperaturas máximas en hasta 24 grados

centígrados. Estos resultados señalan que los arboles pueden contribuir para el resfriamiento y la reducción de islas de calor urbano en climas calientes.

En la Tabla 02 se presenta un breve resumen de los antecedentes mencionados:

TABLA 02					
	AUTOR	LOCAL	OBJETIVOS	MÉTODO	RESULTADOS
2009	HAMADA; OHTA	NAGOIA, JAPÓN	Evaluar la diferencia de temperatura en área urbana, área de pastaje y área de floresta.	Medición de temperatura del aire en área urbana, área de pastaje y área de floresta.	Se observó la influencia significativa de las áreas verdes en la temperatura de 1,9°C durante el día y 0,3°C durante la noche
2011	SUSCA; GAFFON; DELL'OSSO	NUEVA YORK - EUA	Evaluar los efectos positivos de la vegetación en la escala urbana y en el edificio.	Medición de la temperatura del aire en cuatro áreas de la ciudad, simulación computacional para la medición del efecto del albedo de superficie.	En la macro escala fueron observadas medias de 2°C entre las áreas más densificadas y más arborizadas de la ciudad. En la microescala la actividad biológica de plantas y el albedo de la superficie desempeña un papel crucial en el confort térmico local.
2012	CORREA et al	MENDONZA - ARGENTINA	Investigar el confort proporcionado por corredores verdes urbanos (16, 20 y 30 m de largura) con tres especies distintas.	Observación experimental y evaluación de la condición del confort térmico mediante la aplicación del método COMFA.	Los autores observaron que la ciudad presenta un disconfort térmico en 62% del tiempo y que los corredores verdes contribuyen con la morfología urbana para la reducción de islas de calor.

2012	CHOW; BAZEL	PHOENIX- EUA	Investigar alternativas para atenuar mediante métodos sostenible las islas de calor urbano del área metropolitana.	Simulación computacional en clima urbano en microescala en áreas residenciales con diferentes coberturas vegetales existentes.	Se observó que las plantas xerofitas redujeron la temperatura en hasta 2, 5° en la microescala y 1°C en la escala local. Entretanto ese tipo de vegetación genera discomfort térmico a los usuarios porque no mejora la humedad relativa del aire.
2012	HONG ET AL.	PEQUÍN- CHINA	Investigaron el efecto de la vegetación en el clima de un área residencial.	Mediciones de velocidad del viento in loco y simulación numérica.	La vegetación redujo en 46% la velocidad del viento.
2014	MILLWAR D et al.	TORONTO - CANADA	Análisis de como la vegetación urbana puede atenuar los aumentos en la temperatura del aire en el verano, y reducir el ganó solar recibido por los edificios.	Fueron realizadas mediciones in loco con sensores en áreas con y sin vegetación.	Fueron observadas diferencias de hasta 11.7°C entre 10 y 12 horas de temperaturas más frías en las superficies construidas.
2014	ARMOSON; STRINGE R; ENNOS	MANCHESTER - INGLATERRA	Análisis de los efectos de los árboles y del césped en la reducción de las temperaturas regionales y locales en las áreas urbanas durante el verano.	Mediciones de temperatura de superficie de pequeñas parcelas compuestas de concreto y césped en la presencia y ausencia de sombra arbórea.	La vegetación redujo las temperaturas máximas de la superficie en hasta 24°C. En cuanto la sombra arbórea redujo entre 5 y 7°C.

Fuente: (Moraes & Campos, 2015)

### **1.3.1. Investigaciones relacionadas con el tema**

La influencia de la arborización y pavimentación en el confort térmico urbano, han sido asunto de diversos estudios realizados por diversos autores, como SILVA; LABAKI; ANGELINE; DIAS; CALLEJAS; DURANTE; ROSSETI; entre otros citados en esta investigación.

Diversos beneficios proporcionados por la arborización en el espacio urbano son constatados en los estudios de Silva (2009), que tuvo como principal objetivo contribuir con directrices generales de diseño urbano bioclimático para la producción de un espacio público más confortable climáticamente. El autor discute el microclima generado en las vías públicas a partir de la configuración de la arborización y de las veredas del espacio urbano, relacionando los diversos factores que determinan este microclima urbano, tales como la topografía, el revestimiento del suelo, vegetación, la presencia de barreras, pues todo eso altera la incidencia de los rayos solares y de la ventilación.

Martini (2013), en su estudio de tesis de “Microclima y Confort Termico proporcionado por los arboles urbanas en la ciudad de Curitiba – PR”. afirma que la falta de un correcto planeamiento urbano aliado al creciente aumento de la población ha generado diversos problemas en el contexto socio ambiental, entre ellos las alteraciones climáticas que modifican los índices de confort térmico, perjudicando la calidad de vida de la población. El uso de la vegetación es una de las herramientas indicadas para amenizar esos problemas. Las calles arborizadas presentan índices de confort térmico mejores que calles sin arborización.

Para Silva (2016), en su estudio de tesis: “Arborización de vías urbanas el potencial de sombra de las especies”, la arborización de vías urbanas constituye un elemento bastante eficaz en la reducción de altas temperaturas en la camada intraurbana, mediante mecanismos de sombra y evapotranspiración. Entretanto, entre los variados tipos de especies arbóreas, cuáles serían las más

indicadas para la utilización de arborización en las vías, con la finalidad de mitigar la temperatura del aire en el ambiente urbano. La utilización de herramientas computacionales es una alternativa para análisis de esa cuestión, teniendo en vista que, el uso de estos programas auxilia a las investigaciones en el área del planeamiento urbano y la evaluación del ambiente construido, por medio de simulaciones de varios escenarios.

Labaki, (2011), en su pesquisa experimental y cualitativa sobre “La vegetación y su influencia en el confort térmico urbano y sobre la cualidad de sombra producida en áreas arborizadas”, tuvo como motivación la necesidad de cuantificar y cualificar la contribución de la vegetación para el confort térmico, o sea, la atenuación de la radiación solar por la vegetación y sus influencias de esta sobre la temperatura y humedad en las áreas próximas. Se pretendió establecer parámetros adecuados para la elaboración de planos y proyectos que tengan como objetivo el confort térmico urbano. Inicialmente, el principal punto de la pesquisa estuvo entre la relación entre especies arbóreas, agrupamiento de árboles, áreas verdes y el microclima proporcionado por ellas. Posteriormente, se consideró la eficiencia de sombra proporcionada por la vegetación.

Dobbert (2015), en su trabajo de tesis titulado como “Arborización en la ciudad de Campinas/SP- percepción y confort”, investiga la influencia de áreas arborizadas en áreas urbanas. La autora evalúa el grado de interferencia proporcionado por la arborización en el confort térmico y bienestar de la población. Utilizó la metodología de evaluación de confort térmico (PMV- Predicted Mean Vote y PET- Physiologically Equivalent Temperature) y aparte fueron realizadas simulaciones con el programa ENVI-met 3.1 para observar las interferencias micro climáticas causadas por la inserción de vegetación en el medio urbano.

Referente a la influencia de la pavimentación en el confort térmico urbano, Callejas, Durante, & Rosseti (2015), evalúan el comportamiento térmico del pavimento asfáltico durante un ciclo diario, en una región de clima tropical, con vistas a su contribución para el calentamiento de áreas urbanas. Por medio de mediciones de albedo, temperatura del aire, temperatura superficiales externas e internas del pavimento y del flujo de calor, se constató que el albedo se encuadro dentro de los límites propuestos en la literatura (0.16), la temperatura superficial externa e interna fueron superiores a 50 grados centígrados y que el flujo de calor almacenado atingió 244.73 Wm<sup>-2</sup>, superiores a los flujos donde no hay vegetación y de los suelos pavimentados por concreto.

Villar, Araújo & Costa (2013), comentan que los diversos estudios sobre el clima urbano demuestran que la elevación de la temperatura del aire en el medio urbano está más asociada a superficies impermeables y a su nivel de exposición a los tipos de pavimentación. Por lo tanto, los autores verifican las implicaciones de tipos de revestimiento en las estructuras viarias urbanas sobre el clima en la ciudad de João Pessoa –PB. La investigación se dio por la colecta de datos de variables ambientales (temperatura y humedad relativa del aire, temperatura superficial y del globo, velocidad del viento) en vías urbanas.

Neto (2015), evaluó las temperaturas de superficies de algunos materiales utilizados en la pavimentación en la ciudad de Recife – PE, determinando la influencia de esos materiales en los cambios de las variables climáticas, específicamente para el aumento de temperatura y para la reducción de humedad relativa del aire, objetivando mitigar el impacto de las superficies en el confort térmico de los usuarios. El autor caracterizó el perfil micro climático del local y luego en seguida las temperaturas de superficie de cada material relacionándolos con las variables micro climáticas.

Medeiros et al. (2015), en su análisis comparativa de la temperatura de la superficie en la pavimentación en la plaza Garibaldi, Curitiba, busco mejorar el microclima urbano mediante la comparación de tipos de pavimentación y su relación con la temperatura de superficie, favoreciendo la manipulación de estrategias que posibiliten la mejoría del confort térmico urbano.

## **1.4. OBJETIVO**

### **1.4.1. Objetivo General:**

Medir la influencia de la arborización y de la pavimentación en el confort térmico urbano en la Avenida Leopoldo Machado, 2017.

### **1.4.2. Objetivos Específicos:**

- Comparar la temperatura superficial del suelo para diferentes tipos de materiales usados en la pavimentación;
- Comparar la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento en lugares con diferente densidad arbórea.
- Comparación del índice PMV en simulaciones numéricas en escenarios hipotéticos con diferente densidad arbórea.
- Comparación del índice PPD en simulaciones numéricas en escenarios hipotéticos con diferente densidad arbórea.

## **1.5. Limitaciones del estudio**

En Macapá, los estudios relacionados al confort térmico en espacios abiertos aún son pocos, faltando investigaciones y publicaciones científicas que permitan bases y datos sobre el tema, haciendo con que el investigador se depare con diversas limitaciones.

La principal limitación se encuentra en la dificultad de obtención de datos confiables de las variables micro climáticas, debido a la ausencia de estaciones automáticas de medición de variables meteorológicas.

Todos los aparatos de medición usados en esta investigación son profesionales con alto grado de precisión en sus medidas, entretanto no son instrumentos de medición automáticas, imposibilitando analizar series de datos para estudios climatológicos.

Otra limitación de la investigación es la configuración de la herramienta computacional ENVI-met, pues con la resolución de malla de 100 x 100 puntos en la horizontal y 30 niveles en la vertical, no permite simulaciones computacionales de áreas grandes de estudio.

## **2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. BASES TEÓRICAS RELACIONADAS CON EL TEMA**

#### **2.1.1. El contexto urbano y su relación con el clima**

Los primeros conceptos de ciudades fueron abordados en 1976, en la conferencia de Hábitat I y en 1996, en la conferencia de Hábitat II, donde trataron de entender las relaciones de los seres humanos y los impactos que sus actividades ocasionaban en el medio ambiente. Esta preocupación se dio debido al proceso de industrialización que trajo consigo un nuevo modelo de desenvolvimiento económico y de urbanización acelerada, entretanto de manera desorganizada.

Ese nuevo proceso de urbanización trajo consigo una serie de problemas urbanos, para Maricato (2011), comenta que en el Brasil el proceso de industrialización provocó cambios significativos en el modo de vivir de las personas, alterando sus trazos culturales, valores y maneras de acceso y producción de sus viviendas urbanas.

Por lo tanto, las ciudades pasaron a ser modificadas diariamente, uno de los obstáculos enfrentados por la sociedad fue la creciente dificultad en adecuar sus necesidades económicas y diarias al inevitable crecimiento urbano, viene de ahí la tentativa de reintroducir la naturaleza en la ciudad (CANEPA, 2007).

El ser humano pasa a ser considerado entonces un ser efímero, donde su individualidad y libertad se transforman en requisitos primordiales para su nueva identidad, en el cual buscan nuevas necesidades morales y materiales, provocando cambios en los espacios en que habita. Todas esas transformaciones trajeron consigo una nueva percepción de los límites de la naturaleza y nuevas preocupaciones para un modelo de desarrollo económico y social.

A partir del siglo XXI, surgen entonces nuevos cuestionamientos a los daños que el hombre moderno estaban causando al planeta y cuales métodos podrían sustentarla a lo largo de los años, fue un puntapié para una nueva entrada de consciencia de los impactos, ya que hubo la percepción que los recursos naturales irían agotarse en corto plazo de tiempo. Para Pippi et al. (2003), la falta de integración entre la ciudad y el medio ambiente natural vienen ocasionando la degeneración y degradación de los espacios urbanizados.

Surge entonces la sustentabilidad urbana y el desarrollo sustentable de manera a desenvolver espacios que respeten el ambiente natural, bien como, todas las relaciones que se establecen en ese proceso evolutivo, las ciudades pasan a ser vistas como un lugar que pueda ser construido en bases sostenibles, transformándolas para una realidad mejor (MARTINS & CANDIDO, 2013).

Referente a las cuestiones climáticas, estas fueron debatidas por la primera vez en el Club de Roma en el año de 1970, discutiendo las preocupaciones con el clima debido a las actividades humanas que disipan gas carbónico a la atmosfera y consecuentemente elevando las temperaturas del planeta.

De acuerdo con Roaf et al. (2009), comenta que los científicos ya han comprobado los cambios climáticos ocurridos por las actividades humanas y que los mismos pueden modelar los climas futuros. Eso significa que las ciudades juntamente a las diversas actividades realizadas por el hombre están creando una dinámica climática diferente en el planeta y en el contexto urbano.

En el contexto urbano, el clima adecuado, es uno de los criterios más importantes para garantizar el confort térmico de las personas. Entretanto, somos nosotros que creamos espacios que interfieren negativamente a nuestro confort, creando construcciones que son responsables por producir daños al medio ambiente.

Gehl (2015), por ejemplo, comenta que un clima adecuado proporciona la facilidad de desplazamiento de las personas y son temas preferidos de conversación en todos los locales. Sin embargo, no es solamente la actividad humana responsable en interferir en el clima, las temperaturas externas varían también de acuerdo con las estaciones y a su localización geográfica.

Entretanto, en las ciudades el clima se comporta de diferentes maneras y son clasificadas de acuerdo con el espacio climático a estudiar. Cada espacio climático envuelve un espacio urbano distinto, por ejemplo, el meso clima estudia el clima general urbano de una ciudad, suburbio o metrópolis, el topo clima estudia una pequeña parte de un barrio y el microclima estudia una cuadra o edificación. Con eso se puede percibir las diferentes escalas urbanas, medios de observación y factores de organización presentes en cada espacio climático y de esa manera contribuir con la elaboración de diseños arquitectónicos y urbanísticos adaptados al clima.

Para Silva (2009), las clasificaciones climáticas en el contexto urbano son las siguientes:

Tabla 03: Clasificaciones climáticas y espacios urbanos. Fuente: Silva, 2009.

ESPACIOS CLIMÁTICOS	ESPACIOS URBANOS	ESTRATEGIAS DE ABORDAJE		
		MEDIOS DE OBSERVACIÓN	FACTORES DE ORGANIZACIÓN	TÉCNICAS DE ANÁLISIS
Mesoclima	Ciudad grande, barrio o suburbio de metrópolis	Registros móviles (episódicos)	Urbanismo	Especiales
Topoclima	Pequeña ciudad. Parte del barrio/ suburbio de ciudad	Detalle	Arquitectura	
Microclima	Cuadra, Edificación, habitación/sector de habitación	Batería de instrumentos especiales	Habitación	

Sin embargo, la escala más estudiada es referente al microclima urbano, que trata de entender lo siguiente:

“El clima local en una ciudad es influenciado por los materiales constituidores de la superficie urbana, muy diferente de los materiales de las superficies no construidas. Los materiales urbanos poseen una capacidad térmica más elevada que la de los materiales de las áreas de entorno y son mejores conductores. La superficie urbana presenta un aspecto más rugoso que las superficies no construidas, ocasionando mayor fricción entre la superficie y los vientos que atraviesan. Al mismo tiempo, las superficies de las edificaciones actúan como reflectoras y radiadores que en su conjunto aumentan los efectos de la radiación incidente” (Romero, 2001, p. 46).

Para Ordóñez (2014), los factores geográficos como ubicación, topografía e hidrografía, las actividades humanas, juntamente con la propiedad térmica de cada material utilizado en el espacio urbano, son factores que interfieren en la modificación del clima de un lugar, causando espacios con un gran discomfort térmico por las elevadas temperaturas que generan.

Esas alteraciones están debidamente relacionadas con el tamaño y sectores predominantes de actividades del núcleo urbano que pueden ser dimensionadas mediante evaluación comparativa con el clima del campo circundante. Las modificaciones climáticas pueden permitir que las áreas urbanas, en particular las mayores, resulten en verdaderas islas de calor urbano (FROTA & SCHIFFER, 2003).

Las islas de calor urbano (ICU), son un fenómeno climático que ocurre principalmente en las grandes ciudades, consistiendo en la acumulación del calor debido a diversos factores utilizados en la morfología urbana, como la gran cantidad de áreas pavimentadas (concreto y asfalto), disminución de áreas verdes, altas densidades de construcciones y contaminación atmosférica.

Souza & Nery (2010), señala que la retirada de la vegetación y la impermeabilización de la superficie terrestre cambia la dinámica en la camada límite planetario, el ciclo hidrológico es

alterado, así como el albedo y el balance de energía del espacio. Por eso es importante comprender la relación del contexto urbano con sus elementos físicos y naturales.

La sustitución de los elementos naturales como la arborización, por elementos físicos como las edificaciones, ocasionan el aumento de las temperaturas en los grandes centros urbanos, creando el fenómeno de islas de calor (Figura 05), donde el aire de la ciudad pasa a ser más caliente que en las regiones vecinas (PAULA, 2004).

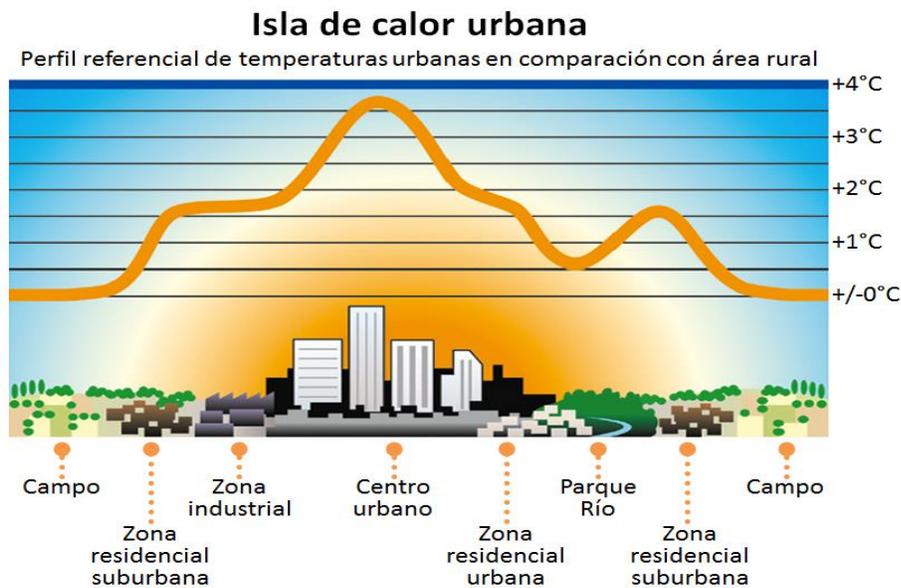


Figura 05: Isla de calor urbana y sus diferencias de temperaturas. Fuente: Paula (2014).

Como se puede observar en la Figura 05, las temperaturas son más elevadas en los centros urbanos debido a la presencia de edificaciones aglomeradas y materiales de gran absorción solar, aparte de la ausencia de arborización en el medio, aumentado la temperatura en más de 4°C, al contrario de las ciudades del campo donde prácticamente no hay aumento en la temperatura.

Referente al fenómeno de islas de calor urbano se comenta lo siguiente:

“Los factores generados del fenómeno de la ICU dependen del clima, de topografía, de la estructura urbana, de las condiciones climáticas en el corto plazo y de fenómenos como la inversión. Sin embargo, los principales elementos que influyen la ICU son de origen antropogénica” (Tumini, 2012, p.35).

Para Tumini (2012), los elementos antropogénicos que influyen en las islas de calor urbano se dan mediante los siguientes aspectos y pueden ser observados en la Figura 06:

- La reducción de las superficies de evaporación debido a la sustitución de las superficies vegetales por edificios y superficies impermeables como calles, plaza, etc.
- Los materiales utilizados en el medio urbano tienen respuestas distintas a la absorción de rayos solares.
- Calor generado por fuentes antropogénicas, como industrias, edificios y utilización de coches.
- Contaminación atmosférica y el efecto invernadero generado por las partículas en suspensión.

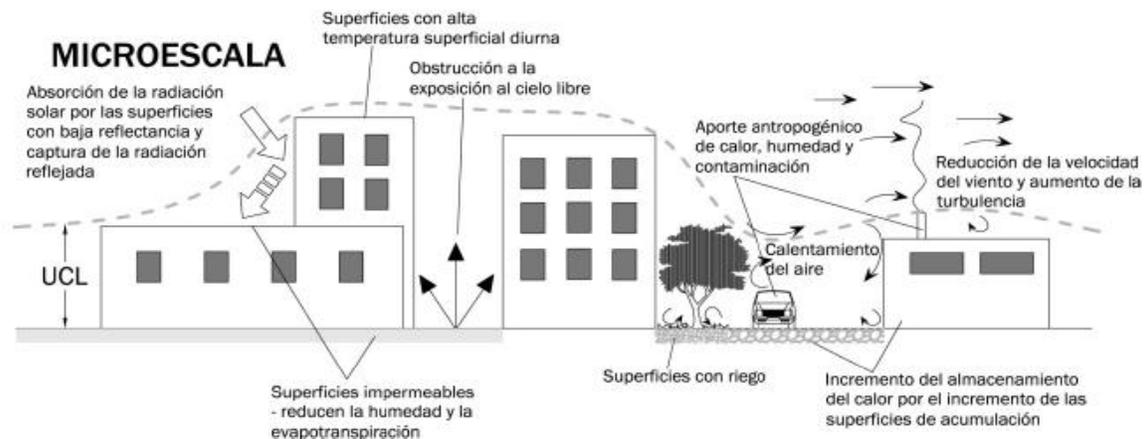


Figura 06: La influencia del calor antropogénico en el clima urbano. Fuente: Tumini, 2012.

Para entender el clima, es necesario entender elementos de la climatología que estudian las variables climáticas en un espacio determinado de tiempo. Para Souza & Nery (2010), la climatología es una ciencia de síntesis aplicada al conocimiento de estados de la atmosfera a un determinado local, y andan juntamente con la meteorología, que observa y trata de explicar los fenómenos climáticos ocurrentes.

Según Romero (2012), el estudio del clima comprende la formación resultante de factores climáticos globales, factores climáticos locales y elementos climáticos. La comprensión de esos principios es de fundamental importancia para la obtención de espacios urbanos climatológicamente orientados que consecuentemente contribuyen para el confort térmico urbano.

Los factores climáticos para Romero (2012), son los siguientes:

- Factores climáticos globales: determinan y dan origen a los aspectos macro o más generales, tales como radiación solar, latitud, longitud, altitud, los vientos y masas de agua y tierra. (Figura 07)

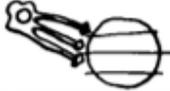
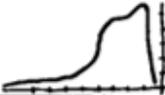
<b>Configuración del clima</b>	
<b>Factores climáticos globales</b>	
	<b>Radiación solar</b> Cantidad/Calidad/Inclinación del eje Terrestre/Equilibrio término terrestre.
	<b>Latitud</b>
	<b>Altitud</b>
	<b>Vientos</b>
	<b>Masas de agua y vegetación</b>

Figura 07: Factores climáticos globales. Fuente: Romero, 2001.

- Factores climáticos locales: son aquellos que condicionan, determinan y dan origen al microclima, o al clima que se verifica en un punto restricto (ciudad, barrio, calle, etc.), como la topografía, la vegetación y la superficie natural o construida (Figura 08).

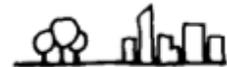
<b>Factores climáticos locales</b>	
	<b>Topografía</b> Declividad/Orientación/ Exposición/Elevación.
	<b>Vegetación</b>
	<b>Superficie del suelo</b> Natural o construido/ <u>Reflexion</u> / Permeabilidad/Temperatura/Rugosidad

Figura 08: Factores climáticos locales. Fuente: Romero, 2001.

- Elementos climáticos: representan los valores relativos a cada tipo de clima, tales como la temperatura, humedad del aire, precipitaciones y los movimientos del aire. (Figura 09)

<b>Elementos climáticos</b>	
	<b>Temperatura</b> Valores medios/ Valores/ Valores extremos/ Diferencias térmicas entre el día y la noche.
	<b>Humedad del aire</b> Absoluta/Relativa/ <u>Presion de valor</u>
	<b>Precipitaciones</b> Lluvia/Nieve (Todo tipo de agua que se precipita de la atmosfera)
	<b>Movimiento del aire</b> Velocidad/Dirección/Cambios diarios y estacionales.

Figura 09: Elementos climáticos.

Fuente: Romero, 2001.

Las variables climáticas o elementos climáticos locales que intervienen en la definición de un clima son las siguientes según (Hernández, 2013):

- **Temperatura del aire:** conviene en primer lugar conocer la evolución anual de la temperatura media mensual, así como temperaturas máximas y mínimas medias del día típico de cada mes, la diferencia entre ellas se le denomina oscilación térmica diaria. Este valor, junto al tiempo transcurrido entre extremos, son indicadores de la potencialidad del clima para el uso de sistemas de acondicionamiento higrotérmico naturales. De forma inmediata, a partir de estos valores máximos, mínimos y medios se pueden obtener temperaturas horarias, aplicando sencillos modelos matemáticos.
- **Humedad relativa del aire:** se trata de una variable de la que habitualmente se disponen pocos datos. A los efectos que nos ocupan, el conocimiento de la humedad relativa media mensual es suficiente para interpretar el clima, con la hipótesis de considerar constante a lo largo del día la razón de mezcla, la humedad específica, la presión de vapor o la humedad absoluta, correspondientes a la temperatura y humedad relativa medias de dicho día. A modo de recordatorio, no está de más indicar que estas dos variables se encuentran relacionadas entre sí, pues la cantidad de vapor de agua en la atmósfera es variable y depende de la temperatura del aire. Así como señalar también que herramientas como los diagramas psicrométricos son ineludibles para determinar fácilmente el resto de los índices de humedad mencionados y para estudiar la evolución de las condiciones del aire en sus posibles transformaciones.
- **Radiación solar:** en las estaciones meteorológicas se tienen datos de intensidad de radiación (potencia térmica por unidad de superficie). En el registro de datos se distingue entre radiación directa (dirigida, compuesta de los rayos de sol que no cambian de

dirección) y radiación difusa (sin dirección determinada, consecuencia de los fenómenos de reflexión de la radiación directa por la presencia de gases en la atmósfera). No hay que olvidar que, respecto de los valores facilitados, que son teóricos, hay que hacer las oportunas correcciones según el número medio de horas de sol y el porcentaje de días nublados del lugar.

- **Viento:** habitualmente se proporcionan datos de frecuencia y velocidad media del viento según ocho orientaciones. Opcionalmente pueden disponerse de valores de rachas máximas de viento. Tan importante como contar con datos mensuales es el conocer el comportamiento del viento en las distintas estaciones del año. La cantidad y periodicidad de datos climáticos necesarios en cada caso depende del uso que vaya a hacerse de ellos, siendo muy diferente el análisis climático necesario para la redacción de un manual, que los que serían necesarios para estudiar el comportamiento de un sistema de acondicionamiento pasivo empleado en el espacio público.

Por lo tanto, se puede concluir que la morfología del contexto urbano (CU), tiene relación directa con los factores climáticos que consecuentemente ocasionan el confort térmico mediante el balance energético del cuerpo humano con el ambiente. Ordóñez (2014), elabora la siguiente escala:



Figura 10: Variables morfológicas que pueden modificar las características climáticas dentro del contexto urbano. Fuente: Ordóñez, 2014.

### 2.1.2. El confort térmico urbano y sus parámetros climáticos y personales

Actualmente sabemos que analizar y entender las variables que interfieren en el confort térmico es importante para establecer estrategias bioclimáticas que contribuyan para el bienestar de las personas. Las ciudades están creando su propio clima debido a las acciones humanas y su calor antropogénico que consecuentemente aumentan las temperaturas en el microclima y las sensaciones de discomfort.

Fornecer al usuario sensaciones de confort térmico sea en espacios abiertos o cerrados es importante para contribuir positivamente en las reacciones físicas y psicológicas del individuo. De acuerdo con la NBR 15220, es definida como la satisfacción psicológica o mental de un individuo en condiciones térmicas del ambiente (MENDONÇA & OLIVIEIRA, 2007).

Para Oliveira (2008), el concepto es altamente abstracto, porque eso varía de individuo para individuo, es necesario analizar inúmeras variables de manera a entender el confort térmico en un determinado ambiente. El confort térmico depende de factores personales (vestimenta y tipo de actividad desarrollada) y ambientales (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento), que interfieren en la sensación de bienestar experimentada por las personas.

Para Lamberts (2016), la importancia del confort térmico está basado en tres factores, son ellos:

- La **satisfacción** del hombre o su bienestar en sentirse térmicamente confortable;
- La **performance humana**, depende del tipo de actividad desarrollada y el estado de discomfort térmico causado por calor o frío excesivo.

- La **conservación de energía**, que permite conocer las condiciones y parámetros relativos al confort térmico de los ocupantes en su ambiente, evitando desperdicios con calefacción y refrigeración.

La sensación de confort térmico es experimentada cuando nuestro organismo está en equilibrio con el ambiente, sin recurrir a ningún artificio de termorregulación, manteniendo la temperatura corpórea en un valor constante, próximo de 37°C, para establecer este equilibrio, varios procesos de cambios térmicos ocurren, tales como evaporación, radiación, conducción y convección (ROMERO, 2000).

Según Lamberts (2016), los cambios térmicos dependen de una serie de factores: la radiación depende de las temperaturas de superficie alrededor, la convección depende de la temperatura y velocidad del aire, la conducción depende de la temperatura de las superficies donde existe contacto físico y la evaporación depende de la actividad física, de la humedad relativa del aire y su velocidad (Figura 11).

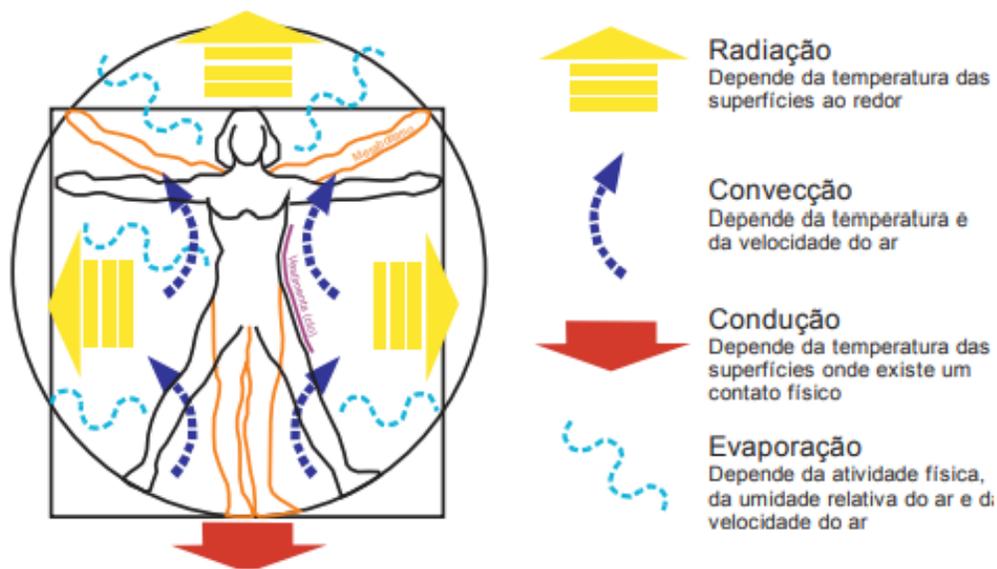


Figura 11: La fisiología humana y sus cambios térmicos. Fuente: Lamberts, 2016.

Entretanto, el equilibrio térmico está lejos de proporcionar sensación de confort. En efecto, el organismo es capaz de conseguir satisfacer el balance térmico en una amplísima gama de combinaciones de situaciones ambientales y tasas de actividad basal, pero sólo una estrecha franja de estas conduce a situaciones que el propio sujeto califique como confortables (ESPAÑOLA, 1983).

Son una serie de condiciones que deben ser analizadas para llegar al confort térmico, como elementos climáticos sumados al factor biológico-fisiológico, sociológico y psicológico (Figura 12). El cuerpo humano puede absorberlos o percibir sus efectos, esforzándose para llegar a un punto de equilibrio, adaptándose a su entorno a punto que solamente requiera un mínimo de energía (MERÇON, 2008).

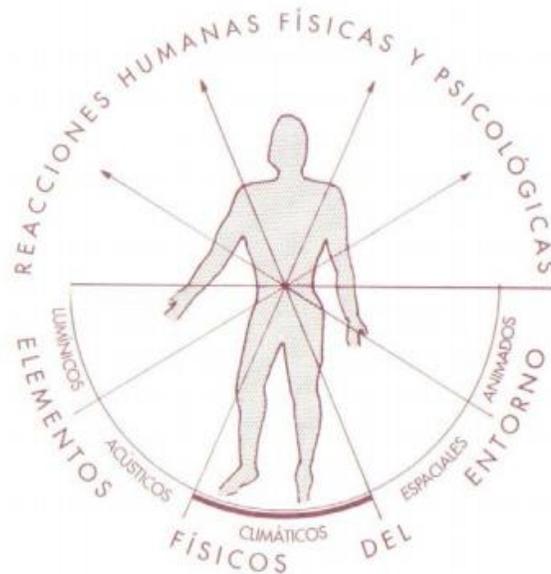


Figura 12: Condiciones a ser analizadas para llegar al confort térmico. Fuente: Merçon, 2008.

Para Gouvêa (2007), es fundamental entender todas las variables mencionadas anteriormente que afectan a esa condición de bienestar, como factores meteorológicos locales y personales y variables externas como la proximidad de la vegetación, el efecto de área sombreada y los cambios en la intensidad del viento que interfieren en el confort térmico de la ciudad y consecuentemente de los usuarios.

Para Lamberts (2016), existen mecanismos para que el cuerpo humano se adapte y se defienda del clima urbano, son ellos:

- **Ajustes comportamentales:** Son modificaciones conscientes o inconscientemente de las personas, para evitar sensación de calor o frío mediante ajustes personales (ropa, actividad, postura), ajustes tecnológicos o ambientales (ventiladores, abrir ventanas, etc) y ajustes culturales.
- **Ajustes fisiológicos:** Son todas las respuestas fisiológicas de las personas a las variables ambientales y térmicas.
- **Ajustes psicológicos:** Son percepciones y reacciones de las informaciones sensoriales. Están enteramente relacionada a los hábitos, exposición repetitiva o crónica al clima.

En el Brasil se presentan estrategias que contribuyen para la elaboración de proyectos con estrategias pasivas que colaboran para el confort térmico. Esas estrategias son presentadas en la norma NBR 15220-3, que varía de acuerdo con la zona bioclimática que se encuentre la ciudad a trabajar. Macapá por ejemplo se encuentra en la zona Bioclimática 8, y deben seguir las estrategias (F-J-K), como se puede observar en la Figura 13.

UF	Cidade	Estrat.	Zona
AC	Cruzeiro do Sul	FJK	8
AC	Rio Branco	FIJK	8
AC	Tarauacá	FJK	8
AL	Água Branca	CFI	5
AL	Anadia	FIJ	8
AL	Coruripe	FIJ	8
AL	Maceió	FIJ	8
AL	Palmeira dos Índios	FIJ	8
AL	Pão de Açúcar	FIJK	8
AL	Pilar	FIJ	8
AL	Porto de Pedras	FIJ	8
AM	Barcelos	FJK	8
AM	Coari	FJK	8
AM	Fonte Boa	FJK	8
AM	Humaitá	FIJK	8
AM	laurete	FJK	8
AM	Itacoatiara	FJK	8
AM	Manaus	FJK	8
AM	Parintins	JK	8
AM	Taracua	FJK	8
AM	Tefé	FJK	8
AM	Uaupes	FJK	8
AP	Macapá	FJK	8

Figura 13: Estrategias de confort térmico según la NBR 15220.

Fuente: NBR 15220.

El detalle de las estrategias del condicionamiento térmico según la norma presentada, son:

F: Las sensaciones térmicas son mejoradas mediante la deshumidificación de los ambientes. Esta estrategia puede ser obtenida mediante la renovación del aire interno por aire externo mediante la ventilación de los ambientes.

J: La ventilación cruzada es obtenida mediante la circulación de aire pelos ambientes de la edificación. Esto significa que, si el ambiente posee ventanas en apenas una fachada, la puerta debe ser mantenida abierta para permitir la ventilación cruzada. También se debe atender para los vientos predominantes de la región y para el entorno, pues el entorno puede alterar significativamente la dirección de los vientos.

K: El uso de resfriamiento artificial será necesario para amenizar la eventual sensación de discomfort térmico por calor.

Para tanto es posible proceder a la evaluación del confort térmico, mediante índices de confort, de los cuales serán destacados el índice de PMV (Predit Mean Vote) que indica el voto medio estimado y el PET (Physiological Equivalent Temperature) que describe las condiciones del ambiente externo (KULKA, 2014).

El PMV es obtenido a partir de las variables ambientales como (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire) y de las variables personales como (metabolismo y resistencia térmica de las vestimentas), conforme (MORENO, 2006). O sea, consiste en un valor numérico que trata de entender la sensibilidad humana al frío o al calor.

El índice de PMV fue creado por Fanger en 1970, para poder calcular la combinación de las variables ambientales, partiendo de una ecuación de balance térmico para el cuerpo humano. El método de Fanger relaciona la diferencia entre el calor producido y el calor libertado por el cuerpo humano con la votación media previsible de un painel de evaluación en una escala de sensación térmica (OLIVEIRA, 2008).

El método de Fanger calcula entonces una combinación de variables, tales como: temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa, actividad física y vestimenta, por lo tanto, esas variables son fundamentales para determinar el confort térmico urbano. Mediante esa combinación se estima el voto medio, el cual indica escalas de sensación térmica variando entre valores de + 3 hasta - 3. Donde el PMV de confort es igual a cero, valores positivos indican sensación de calor y valores negativos indican sensación de frío (Tabla 04).

A partir de esas escalas, fueron implementados el concepto de personas insatisfechas PPD (siglas en ingles de Predicted Percentage of Dissatisfied), de acuerdo con la norma ISO 7730 de 1974, son índices de discomfort térmico, que considera el porcentaje de un gran grupo de personas que les gustaría que el ambiente estuviera más caliente o más frío en relación con las escalas de sensación térmica del PMV.

Tabla 04: Escalas de sensación térmica. Fuente: ASHRAE, 2005.

PUNTUACIÓN	SENSACIÓN TÉRMICA
+3	Mucho calor
+2	Bastante calor
+1	Algo de calor
0	Neutra
-1	Algo de frío
-2	Bastante frío
-3	Mucho frío

En la figura 14, se puede observar que la escala PMV corresponde a un valor entre -0.5 a + 0.5, donde la sensación térmica es neutra y por lo tanto el índice de PPD es menor que 10%. Si los valores se encontraran entre 1 o 2, la sensación térmica seria de mucho calor, aumentando el porcentaje de personas insatisfechas.

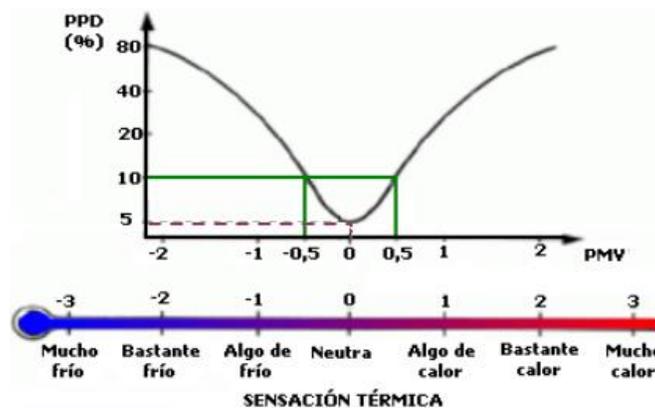


Figura 14: Porcentaje de PMV/PPD. Fuente: ASHRAE, 2005.

### **2.1.3. La pavimentación urbana y sus influencias en el confort térmico urbano**

Según Rolón (2006), las vías pueden ser definidas como espacios de dominio y uso público, destinados a posibilitar el movimiento de los peatones, los vehículos y los medios de transporte colectivo en las áreas urbanas, así como la estancia de peatones y el estacionamiento de vehículos en dichos espacios.

El sistema viario últimamente viene siendo tratado como espacios destinados solamente para el desplazamiento de vehículos y de personas, entretanto hay una serie de aspectos que deben ser analizados antes de implementarlos en la morfología urbana, como es el caso de los materiales que son utilizados en la pavimentación.

Rocha, et al. (2011), consideran que el tipo de material utilizado en la pavimentación influyen en el clima y consecuentemente en el confort térmico urbano, debido a las alteraciones que ocasionan en el contexto urbano y por la sustitución de las superficies naturales por superficies artificiales.

Para Ribeiro (2016), los materiales urbanos poseen una capacidad térmica más elevada que los materiales existentes en áreas del entorno y son mejores conductores de calor, interfiriendo de manera significativa en el medio ambiente. Como fue mencionado anteriormente las superficies urbanas modifican el microclima urbano por sus coeficientes de absorción de radiación solar y emisión de energía térmica, elevando las temperaturas y favoreciendo la formación de islas de calor.

Romero (2011), comenta que las superficies de la pavimentación actúan como reflectores y radiadores en el medio urbano y el tipo de material utilizado influencia en esas condiciones,

mayores áreas pavimentadas por lo tanto contribuyen para el incremento de islas de calor y consecuentemente temperaturas más elevadas en el espacio urbano.

Entretanto, cada material utilizado en la pavimentación posee propiedades físicas diferentes que elevan las temperaturas por su capacidad de almacenamiento de calor y la radiación solar recibida por las superficies construidas. Romero (2001), ilustra las diferencias de temperatura de los materiales utilizados, como se puede observar en la Figura 15. El asfalto por ejemplo eleva drásticamente las temperaturas en comparación con la utilización de piedras o césped en la morfología urbana.

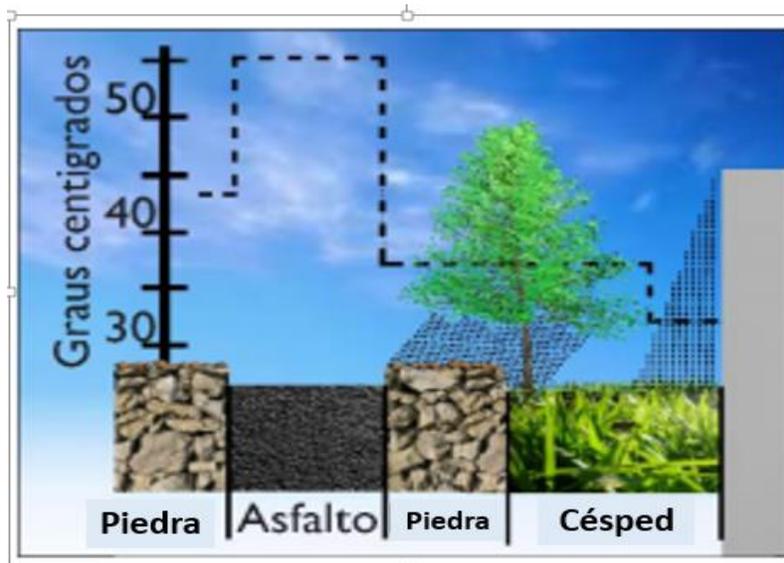


Figura 15: Capacidad térmica de los materiales del entorno. Fuente: Romero, (2001).

Para Rocha et al. (2011), la utilización de materiales y sus propiedades físicas utilizadas en las ciudades son factores que irán a determinar la reflexión, absorción o almacenamiento de calor en el contexto urbano (Figura 16).

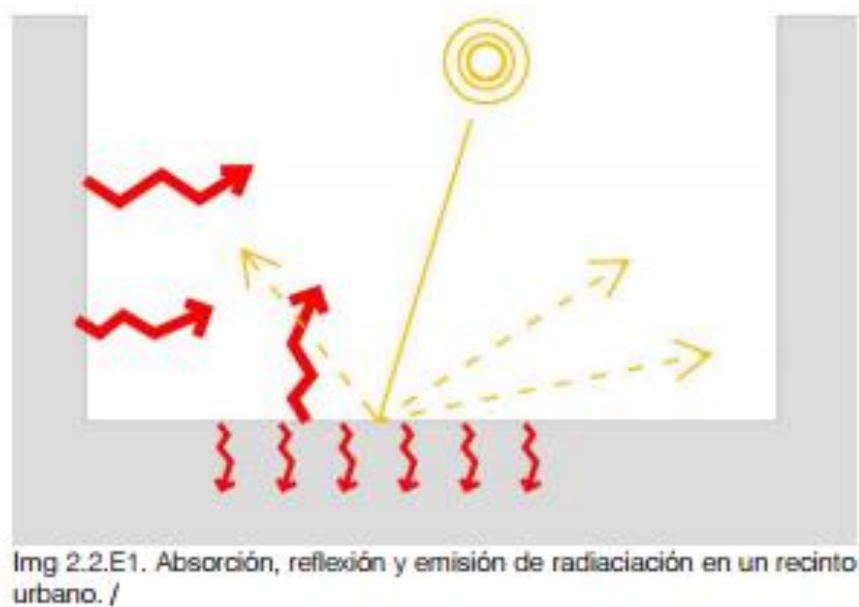


Figura 16: Absorción, reflexión y emisión de radiación en un recinto urbano. Fuente: Hernández, 2013.

Muchos autores constatan la relación de confort térmico urbano con las calidades de los materiales constructivos utilizados en el siglo XXI. Santamouris, Syneffa, & Karlessi (2012), convergen sus análisis para la importancia de los materiales urbanos desarrollados en la generación de islas de calor, como se puede observar en la (Tabla 05), determinando el valor de albedo y su capacidad de emisión de radiación en los diferentes materiales desarrollados por el hombre.

Para Frota & Schiffer (2003), algunos cuidados deben ser tomados cuanto al revestimiento del suelo en vuelta de las construcciones y a lo largo del recorrido de las superficies externas, debido a la capacidad de los materiales en almacenar calor. Es una situación preocupante aún en ciudades con clima ecuatorial húmedo, que presentan elevadas temperaturas, ya que el calor almacenado, al ser devuelto para el aire, se direccionan tanto el interior como para el exterior de las edificaciones.

Tabla 05 – Análisis de los materiales urbanos desarrollados por el hombre. Fuente: Hernández, 2013.

SUPERFICIE / SUPERFÍCIE	ALBEDO	EMISIVIDAD / EMISSIVIDADE
MATERIALES DESARROLLADOS POR EL HOMBRE / MATERIAIS DESENVOLVIDOS PELO HOMEM		
Asfalto	0.05-0.2	0.95
Hormigón / Betão	0.1-0.35	0.71-0.9
Ladrillo / Tijolos	0.2-0.4	0.9-0.92
Acero corrugado / Aço corrugado	0.1-0.16	0.13-0.28
Pintura blanca fresca / Pintura branca fresca	0.7-0.9	0.85-0.95
Vidrio limpio / Vidro limpo	0.08	0.87-0.94
MATERIALES NATURALES / MATERIAIS NATURAIS		
Bosques / Florestas	0.07-0.2	0.98
Hierba / Hortas	0.15-0.3	0.96
Suelo mojado / Solo molhado	0.1-0.25	0.98
Suelo seco / Solo seco	0.2-0.4	0.9-0.95

Anandakumar (1999), comenta también que las áreas pavimentadas contribuyen para la formación de islas de calor, ya que se calientan con la incidencia de radiación solar, por el almacenamiento de energía térmica y por la liberación de calor para el ambiente y a su alrededor, principalmente en el periodo nocturno, mediante el flujo de calor sensible y la radiación infrarroja.

La suma y pérdida de toda energía radiante recibida dependen de factores físicos y termodinámicos asociados a los siguientes indicadores: albedo, emisión, rugosidad de la superficie, capacidad, conductividad, difusión y efusividad térmica de los medios, como se puede observar en la tabla 06.

Tabla 06 - Propiedades termo radiante de la pavimentación. Fuente: Silva, 2009.

Tipo de Superficie	Albedo	Emissividade	Conductibilidad e (W m-1 K-1)	Difusividade (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> x 10-6)	Efusividade (J m-2s-1/2 K-1)
Solos (secos)	0,05 – 0,40	0,90 – 0,94	0,06 - 0,3	0,10 - 0,24	190 - 620
Concreto denso*	0,10 – 0,35	0,90 – 0,96	1,28 - 1,74	0,63 - 0,72	1604 - 2048
Pavimento Asfáltico**	0,05 – 0,20	0,95	1,39 - 1,56	0,45 - 0,52	1689 - 1957

El rol de los materiales utilizados en la pavimentación es un aspecto decisivo sobre las ganancias térmicas y el sobrecalentamiento en las zonas urbanas, ya que los materiales expuestos a la radiación convierten la radiación solar recibida en calor, que en parte se acumula y otra parte se reemite hacia la atmósfera en función de las características físicas del material.

Las investigaciones muestran que la alta capacidad térmica y absorción de los materiales sumada a la gran extensión de superficie expuesta, son significativas en el aumento de la temperatura en las ciudades, como se puede observar en la figura 17 (ORDÓÑEZ, 2014).

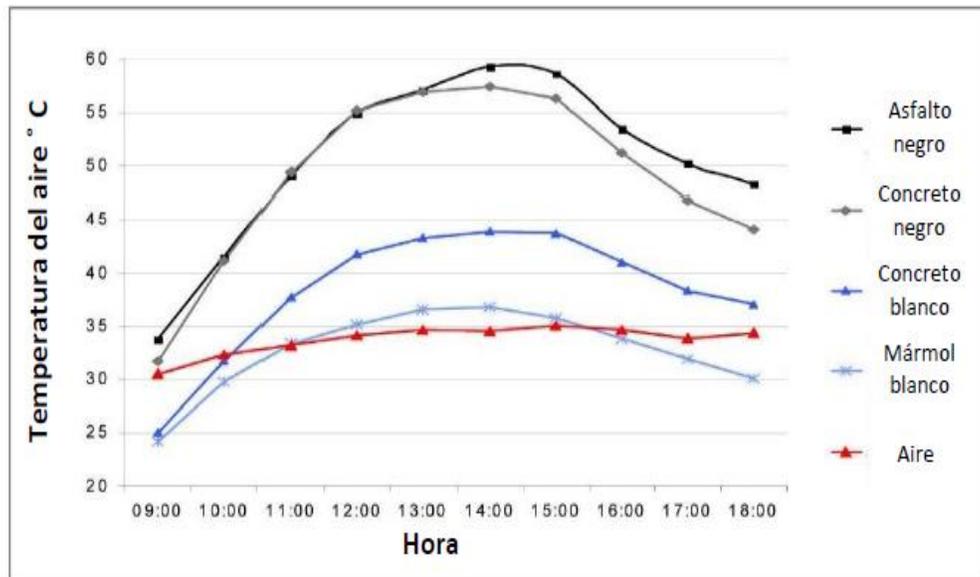


Figura 17: La influencia de los materiales en la temperatura del aire. Fuente: Ordoñez, 2014.

#### **2.1.4. Arborización urbana y sus beneficios en el confort térmico urbano**

Los árboles urbanos contribuyen con diversos beneficios y funciones, sean ellos para los ciudadanos o para el medio ambiente. Esos beneficios pueden ser estéticos o funcionales para las ciudades, extendiéndose desde el confort térmico urbano y el bienestar psicológico de los seres humanos hasta la regulación de los ecosistemas.

Actualmente, los seres humanos y la naturaleza pasan a disputar un espacio en el paisaje urbano, así como cualquier otro elemento de carácter práctico como la electricidad, edificios, veredas, entre otros que causan impactos en la morfología urbana. Antiguamente la arborización urbana era vista de otra manera y tenía un papel fundamental en la ornamentación y embellecimiento de las ciudades.

De acuerdo con (Lima A. M., 1992):

“La práctica de plantar árboles en avenidas o plazas se inició en el siglo XVII con Luis XIV, en Francia, y después se extendió por todo Europa. Ya en Brasil, existen dos escenarios probables para el inicio de la arborización urbana: El primero es más antiguo, a final del siglo XVIII, donde el arquitecto naturalista Antonio José Landi habría plantado muchos árboles de la especie mango por las calles de la ciudad de Belém/PA, con la finalidad de estudiar y promover la adaptación de la especie a un nuevo ambiente. El segundo es en Rio de Janeiro, en inicio del siglo pasado, época en que el plantío de árboles en las ciudades se difundía como nueva exigencia por el mundo.” (Lima 1992, p.5)

La ausencia de arborización urbana y áreas verdes en las ciudades causan una serie de alteraciones en el microclima, ese escenario contribuye para que las temperaturas sean más elevadas en los centros urbanos como ya mencionado anteriormente. Entretanto, muchos no conocen los beneficios que la arborización urbana puede traer a las ciudades y los maleficios que la inexistencia de ellas ocasiona. Para Sukopp & Werner (1989), los beneficios son los siguientes:

- Ornamentación de la ciudad.
- Proporcionar espacios recreativos para la expansión de la población y favorecer su contacto con la naturaleza.
- Mejorar las condiciones climáticas, de humedad y control de la temperatura, para establecer un microclima local adecuado en los espacios abiertos.
- Reducir la contaminación ambiental, ya que las hojas depositan partículas contaminantes en suspensión, sirviendo como filtros y atenuadores de la velocidad del viento.
- Amortiguar los ruidos de baja frecuencia.
- Proporcionar espacios adecuados para el desarrollo de la vida animal.
- Reflejar los cambios estacionales a lo largo del año, lo que produce efectos psicológicos beneficiosos sobre la población residente y visitante.

La presencia de árboles en las ciudades interfiere en el lado psíquico del hombre, atenuando el sentimiento de opresión, por poseer una enorme diversidad de forma, de colores y de tonalidades, las varias especies de árboles proporcionan sensaciones de bienestar, de felicidad y de alegría. Cuando bien localizadas, las arboles organizan los espacios urbanos transformando esos espacios en puntos de referencia al desplazamiento humano (ENERGIA, 2008).

Oliveira (1996), también destaca algunos beneficios importantes, como por ejemplo el control climático y la disminución de la contaminación del aire y acústica, también proporcionando la cualidad estética del paisaje urbano, aumentando el confort sobre la salud mental y física de las personas.

En regiones tropicales, donde las temperaturas son elevadas, la arborización es un elemento primordial para el confort térmico urbano, y sus beneficios son más aun perceptibles. Para Amazonia (2013), esos efectos son perceptibles por la población por medio del sombreado proporcionado por las copas de los árboles, por la ventilación y por la reducción de la luminosidad.

Para Lucia & Mascaró (2005), la arborización urbana tiene importancia fundamental para el confort térmico urbano, debido a la creación de caminos sombreados (Figura 18). Voogt (2004), también destaca la influencia de la arborización urbana en el conforto térmico urbano, mediante la reducción en la temperatura y de sombreado de vías y estacionamientos, evitando la calefacción excesiva de los materiales como asfalto y concreto y la liberación de calor durante la noche.

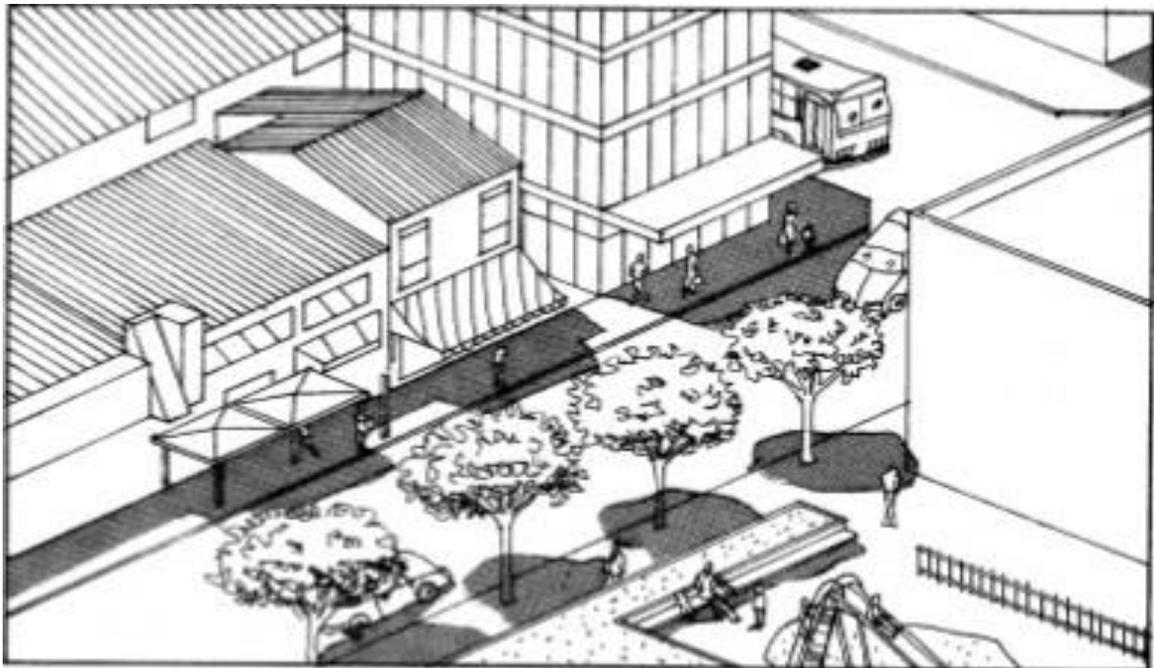


Figura 18: Importancia de la vegetación al crear caminos sombreados. Fuente: Lucia & Mascaró, 2005.

De acuerdo con Merçon (2008), la vegetación funciona como elemento de control térmico, proporcionando sombra y minimizando los efectos del calor. En la sombra de los árboles la temperatura puede ser casi 3 °C más baja que en el sol en las mismas condiciones (Figura 19).

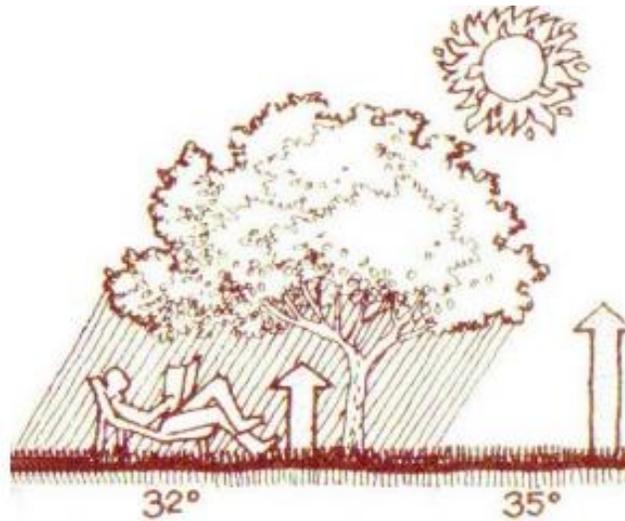


Figura 19: Efecto térmico producido por la sombra de un árbol. Fuente: Merçon, 2008.

Matos & Queiroz (2009), señalan que la arborización urbana reduce la temperatura ambiente y hacen con que el clima local se torne más ameno, esos efectos se desarrollan debido a la intercepción de los rayos solares, del lanzamiento de agua en el ambiente, de la transpiración, de la absorción de parte del calor recibido y del favorecimiento de la ventilación.

Para Shinzato (2009), los efectos directos de sombreado originados por la arborización pueden ser cuantificados por las mediciones de las temperaturas de la superficie y de los materiales expuestos y protegidos por las copas de los arboles. El desempeño térmico del espacio urbano también es influenciado por las propiedades termo-físicas de los materiales presentes en las áreas urbanas, cambiando drásticamente las diferencias de temperatura. Para Mascaró (2002), se pueden percibir grandes diferencias de temperatura debido a la presencia de arborización, por

ejemplo bajo el árbol la temperatura superficial del suelo llega a los 17°C y del asfalto bajo al sol sin presencia de arborización llega a los 50 °C (Figura 20).

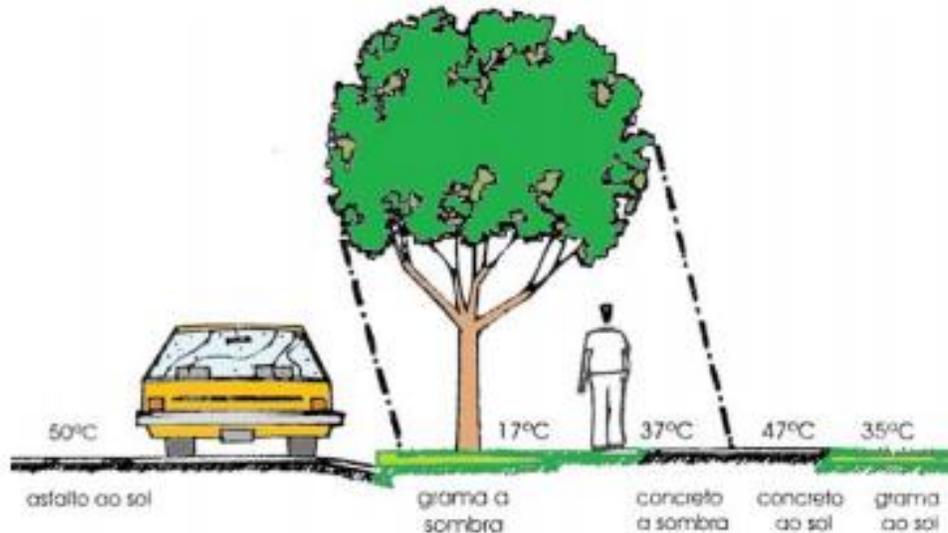


Figura 20: Propiedades termo- físicas de los materiales urbanos vs arborización y sus diferencias de temperatura. Fuente: Laurie, 1978 & Mascaró 2002.

Por lo tanto, los efectos positivos de la arborización urbana pasan a ser cada vez más deseados en el contexto urbano, pues con el crecimiento urbano de las ciudades, los ambientes anteriormente naturales ricos de vegetación pasan a ser compuesto de materiales estrictamente urbanos, reduciendo la presencia de árboles en este escenario (SILVA & ROMERO, 2010).

Con relación al clima, los arboles auxilian en el confort térmico asociado a la humedad del aire y a la sombra, contribuyendo también con el de 10% en la energía gasta para regular la temperatura de un edificio, ayudando en la mejoría de la calidad del aire y en la reducción de los

contaminantes atmosféricos. Ellos también absorben agua, mejorando así, la infiltración de agua en el suelo, disminuyendo el riesgo de inundaciones y erosiones.

Los árboles urbanos contribuyen con ciudades más amenas al calor, el cemento y el asfalto de las ciudades absorben la energía del sol e irradian de vuelta para el ambiente, calentando el aire en las ciudades. Los árboles presentes en el contexto urbano fornecen sombra, y resfrían el ambiente por la transpiración del agua (Figura 21).

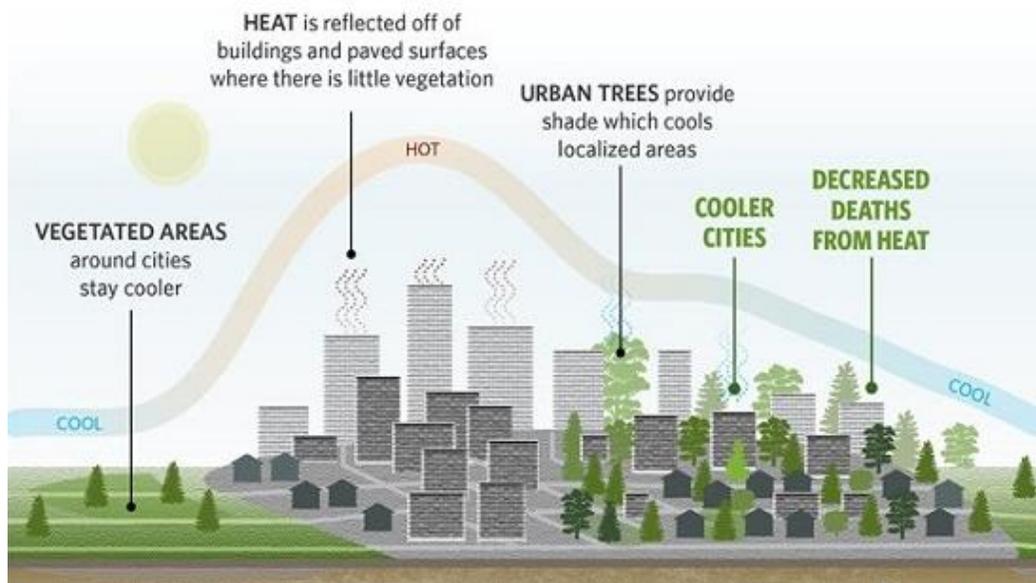


Figura 21: Los beneficios de la arborización urbana. Fuente: Planting Healthy Air, 2017.

Romero (2010), comenta que las variaciones de temperatura se dan de acuerdo con el agrupamiento de arborización urbana en la morfología de la ciudad, sumada a las variables externas del clima como las estaciones del año. En la Tabla 07 se observa las variaciones de temperatura en espacios abiertos de acuerdo con el agrupamiento de arborización.

Tabla 07: Variaciones de temperatura en espacios abiertos de acuerdo con el agrupamiento de arborización. Fuente: Silva & Romero, 2010

Variaciones de temperatura sobre vegetación en espacios abiertos (C°)				
Orientación	Verano	Otoño	Primavera	Invierno
Arboles aisladas	-3,7 a -1,3			-8,0 a -1,0
Agrupamiento heterogéneo	-4,4	-3,6 a -2,8	-	-5,0
Agrupamiento homogéneos	-4,7	-3,1	-3,7 a -3,2	-5,1

Se observa que el agrupamiento de árboles, su disposición y densidad tienen influencia en las reducciones de temperatura. En verano donde las temperaturas son elevadas, el agrupamiento homogéneo disminuye la temperatura en hasta menos 4.7°C grados y arboles aisladas disminuyen en hasta menos 3.7 a -1.3°C. Todos esos beneficios se deben a la obstrucción de la radiación solar directa y por, por la disminución de las temperaturas superficiales durante el día y el enfriamiento radiactivo durante el periodo de la noche, colaborando con el confort térmico urbano (Figura 22).

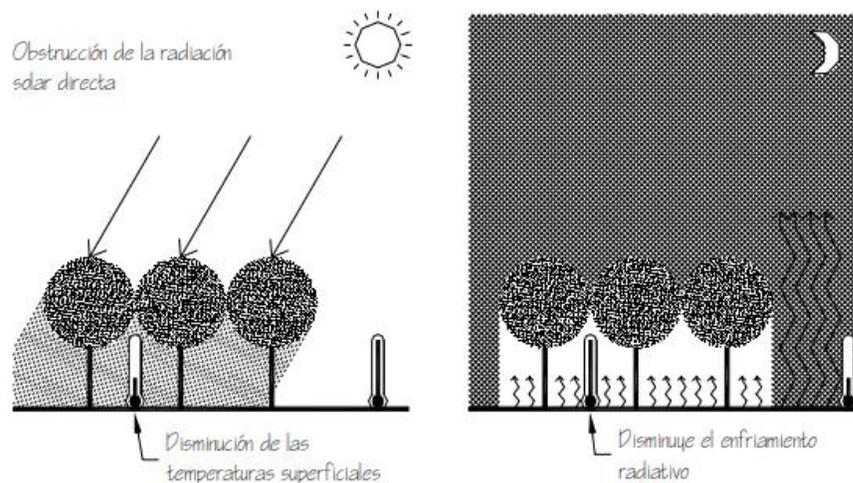


Figura 22: Beneficios de la arborización urbana en las ciudades. Fuente: De la Torre, 1999.

## **2.1.5. Perfil Urbano, climático y ambiental de la ciudad de Macapá**

### 2.1.5.1. Un breve resumen del perfil urbano de la ciudad de Macapá

El municipio de Macapá, capital del estado de Amapá, localizada en la región norte de Brasil, se caracteriza por su papel de ciudad puente, de articulación regional y centralizadora de la mayor parte de la infraestructura disponible en el estado. La ciudad, al largo de los últimos cincuenta y cinco años, viene experimentando un proceso constante de urbanización, en surtos de ocupación. Desde el final de los años 50, propuestas y concepciones fueron idealizadas para la ciudad de Macapá, proyectada en los Planos Directores, buscando una mejor organización del espacio urbano.

Diversos factores contribuyeron para el crecimiento de la población y la evolución de la ciudad de Macapá, los cuales ocurrieron en un pequeño espacio temporal, tales como: creación del Territorio Federal, proyectos en el sector minero, el cambio de Territorio Federal para el estado de Amapá en el año de 1943, y la migración de las poblaciones de islas fronterizas del Pará, estado vecino de Macapá.

Conforme los estudios de Santos (1994), en el recorrer de los años las características de la población se adaptaron de acuerdo con los cambios que ocurrían en la ciudad, entretanto el desenvolvimiento no acompañó el crecimiento. Muchos moradores antiguos vendieron sus terrenos y dieron lugar a otras personas que influenciaron en la modificación del paisaje y en la arquitectura de las edificaciones.

Con la creación del Territorio Federal de Amapá, los proyectos en el área mineral, y la creación del estado y el área de libre comercio, migraron poblaciones para la ciudad de Macapá

en índices elevados, donde contribuyo fuertemente para el crecimiento y evolución de la ciudad en un pequeño espacio temporal. Entretanto, el proceso de urbanización se puede percibir más intensificado en los años de 1991 a 2000 como se puede observar en la (Figura 23) y su evolución es creciente en los últimos años.

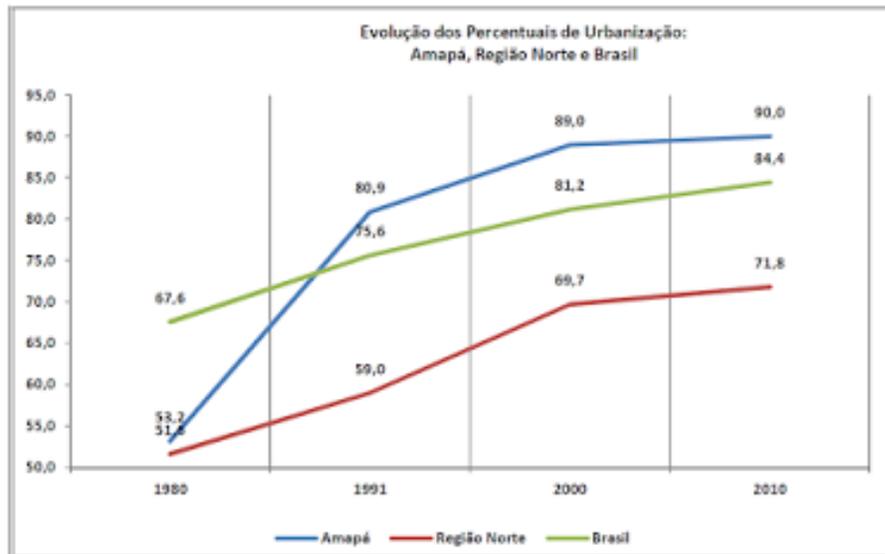


Figura 23: Evolución de los porcentuales en la región norte, Amapá y Brasil. Fuente: Tostes, 2013.

Actualmente el funcionalismo público es determinante en la economía de la ciudad de Macapá, por ser el principal generador de empleos de la población, al cual también atrae inmigrantes de otros estados brasileños en busca de la estabilidad económica. Como consecuencia inversiones internas y externas están siendo inyectados en la ciudad, principalmente en el área de servicios, recreación e inmobiliario.

Considerando esta situación, se observa que las ciudades han evolucionado con el pasar de los tiempos y se convirtieron en organismos complejos a ser administrados para atender las

exigencias de una sociedad plural, donde las personas participan y tienen modos de vivir diferenciados cuanto, a su nivel económico, social y cultural, trayendo la creación de nuevas áreas.

Para Tostes (2006), apenas 4% de la ciudad de Macapá posee red de desagüe, con concentración en el barrio central de la ciudad, la iluminación pública es deficiente (en determinados locales es prácticamente inexistente), no hay arborización y tampoco paisajismo planeado para la ciudad, la pavimentación es sin calidad e inadecuado, no hay drenaje pluvial y en los locales que poseen veredas no siguen un padrón y tornan la vía pública inaccesible a los portadores de deficiencia, adultos mayores y niños.

#### 2.1.5.2. Caracterización climática de Macapá

La ciudad de Macapá es caracterizada por recibir durante todo el año una gran cantidad de energía solar, lo que le proporciona un clima caliente y húmedo, también hay fuerte presencia de precipitaciones durante el año, debido a la migración anual de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Figura 24).

La ZCIT es uno de los más importantes sistemas meteorológicos actuando en los trópicos, ella es parte integrante de la circulación general de la atmósfera, según MASTER<sup>1</sup> (Meteorología aplicada a sistemas de tiempos regionales), además es asociada a la confluencia de los vientos alisios.

---

<sup>1</sup> Master – Meteorología Aplicada a Sistemas Regionales de Tiempo – Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas – Universidad de São Paulo. Link: <http://www.master.iag.usp.br/>

Segundo de Souza & Cunha (2010), se observa próximo a la costa del estado de Amapá condiciones oceánicas y atmosféricas que favorecen la formación de nubes convectivas sobre el Océano Atlántico Ecuatorial, en el cual se pueden propagar en dirección a la Amazonia. La región sufre muchas veces anomalías en las medias climatológicas debido a los eventos climáticos extremos, resultantes de fenómenos como El Niño o La Niña, entre otros (DE SOUZA ET AL., 2000).



Figura 24: Amapá y la ZCIT. Fuente: Tavares, 2014.

La incidencia de radiación solar es mucho mayor en la región tropical que en otras regiones de la tierra, en Macapá la elevación del sol al medio día varia más o menos en torno de los 90 grados y eso se debe por la ciudad estar atravesada por la Línea del Ecuador. De acuerdo con Tavares (2014) los mayores valores de temperaturas elevadas ocurren en los meses de equinoccios, cuando el sol pasa en la vertical en la Línea de Ecuador en los meses de marzo y septiembre.

De acuerdo el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), los registros de temperaturas en los años entre 1981- 2010, se presentaron en valores máximos en los meses de noviembre y diciembre, con una temperatura de 39.6 °C, como se puede observar en la tabla 08 a seguir.

Tabla 08: Registros climatológicos de 1981-2010. Fuente: INMET.

Dados climatológicos para Macapá													[Esconder]
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima recorde (°C)	34	33,5	34	34,2	36	35,1	35,2	35,6	36,1	36,5	39,6	38	39,6
Temperatura máxima média (°C)	30,2	29,9	30	30,4	30,8	31,3	31,6	32,4	33,1	33,3	33	31,9	31,5
Temperatura média compensada (°C)	26,3	26	26,2	26,5	26,7	26,7	26,7	27,5	28,2	28,5	28,3	27,5	27,1
Temperatura mínima média (°C)	23,4	23,4	23,6	23,9	24	23,7	23,5	24	24	24	24,1	23,9	23,8
Temperatura mínima recorde (°C)	19,6	20,4	21,1	21,4	21,4	21	20,2	21	21	21	21	20,4	19,6
Precipitação (mm)	294,7	343,3	394,2	384	319,5	244,7	190,8	92,4	28	34,8	69,7	153,5	2 549,7
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	18	19	21	21	21	19	16	9	3	3	4	10	164
Umidade relativa compensada (%)	85,9	87,8	87,9	88,1	87,5	85,6	83,5	79,8	74,1	72,5	73,7	79,5	82,2
Horas de sol	158,1	117,1	120,9	125,8	164,5	198,9	234,3	267,6	273,6	285,3	254,9	215	2 416

Según PROJETEEE<sup>2</sup> (Proyectando Edificaciones Energéticamente Eficientes), los datos climáticos de temperatura la ciudad de Macapá son elevadas durante todo el año. La temperatura media mensual en el mes de agosto por ejemplo se caracteriza por temperaturas de 27.23°C, teniendo como máximas de 32.29°C y mínimas de 21.99°C y la zona de confort se encuentra en los 22.37°C – 29.37°C de temperatura (Figura 25).

<sup>2</sup> El Projeteee es una herramienta pública con una interface de fácil uso y tiene mensualmente cerca de 20 mil accesos. Además de servir como soporte didáctico a alumnos de arquitectura, la plataforma posibilita que los profesionales de construcción civil integren a sus proyectos la variable de elementos bioclimáticos, lo que garante la reducción de demanda energética y el confort de los usuarios. <http://projeteee.mma.gov.br/sobre-o-projeteee/>

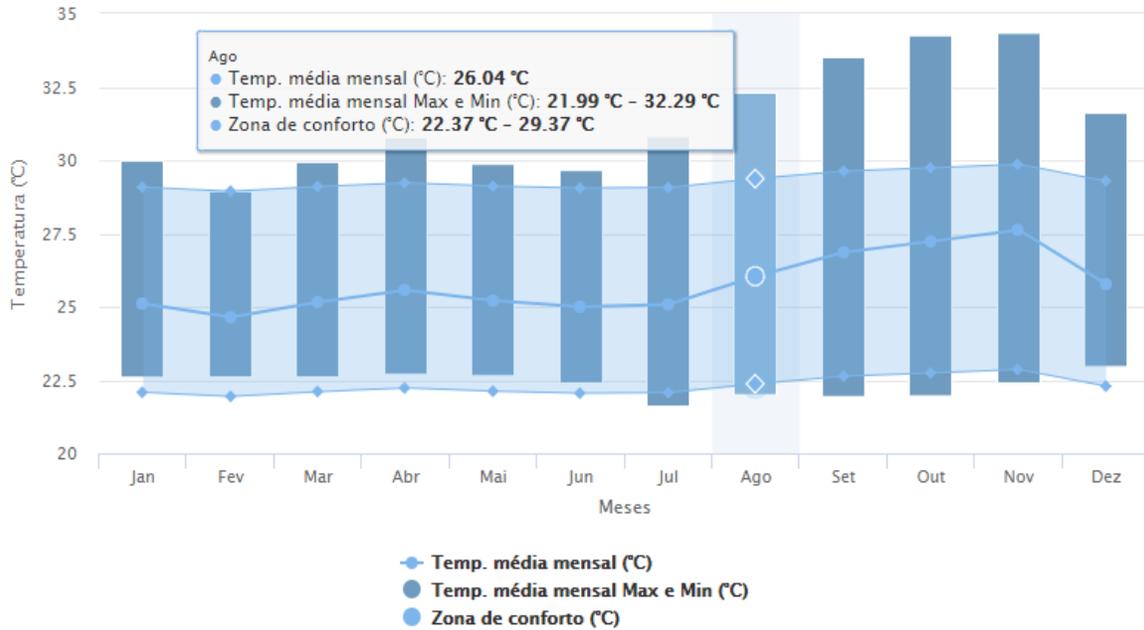


Figura 25: Temperaturas e zona de confort de la ciudad de Macapá. Fuente: Projeete, 2017.

Las variables climáticas más importantes de interés para estudios de confort térmico urbano en esta investigación son las siguientes: temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del aire y la temperatura superficial de suelo. Esas variables influyen directamente en la sensación de bienestar de los usuarios en el ambiente urbano.

Referente a la humedad relativa del aire, es la relación entre la cantidad de agua existente en el aire (humedad absoluta) y la cantidad máxima que podría haber en la misma temperatura (punto de saturación). En locales con altos porcentajes de humedad, como en Macapá por ejemplo existe el disconfort térmico con sensación de ahogamiento y dificultad de evaporación del sudor y la reducción de la temperatura corporal.

En la figura 26 a seguir, se observa que la humedad relativa es alta en la ciudad de Macapá, en el mes de agosto la humedad relativa media mínima y máxima llegan a porcentajes de 70.39 – 88.61%.

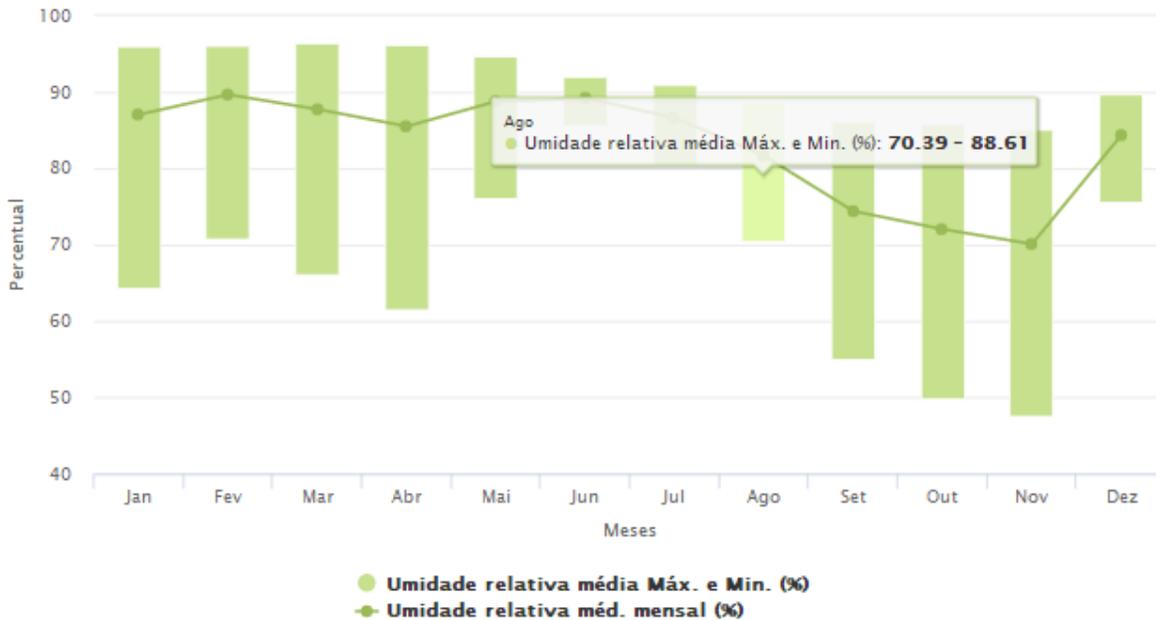


Figura 26: Porcentajes de humedad relativa en la ciudad de Macapá. Fuente: Projeteo, 2017.

Referente a los vientos en la ciudad de Macapá, su sentido se da del Noreste (NE), con variaciones entre este- noreste (ENE) y este (E) (Figura 27). La intensidad también varía durante el año, más de manera general la ciudad es ventilada, con vientos no tan fuertes (0 a 25 m/s) (TAVARES, 2014), basadas en las estadísticas de las observaciones tomadas entre el 10/2008 - 07/2017 diariamente entre las 7 de la mañana y las 7 de la tarde hora local.

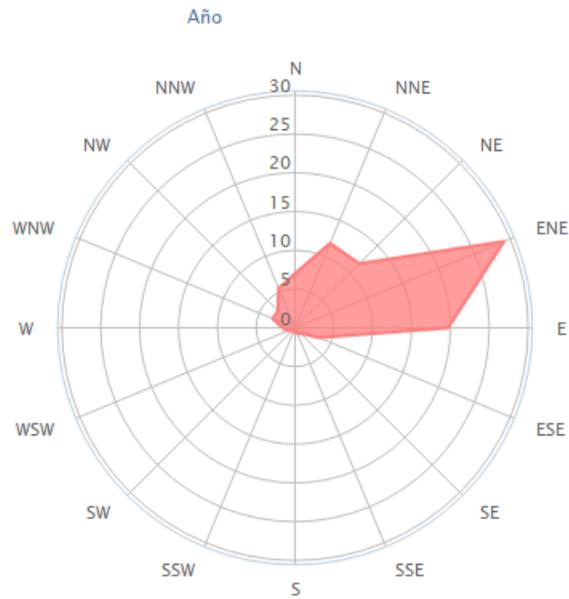


Figura 27: Dirección de los vientos de la ciudad de Macapá. Fuente:

<https://www.windfinder.com/windstatistics/macapa>

Las temperaturas del aire en la ciudad de Macapá de acuerdo a datos estadísticos varían entre los 26 ° C como mínima y 32 ° C como máxima, como se puede observar en la Tabla 09.

Tabla 09: Velocidad del viento y temperatura media del aire de Macapá. Fuente:

<https://www.windfinder.com/windstatistics/macapa>

Mes del año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Año
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Dirección del viento dominante	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
Probabilidad de viento >= 4 Beaufort (%)	15	13	8	7	5	5	7	15	31	36	36	26	17
Velocidad media del viento (kts)	7	7	7	6	6	6	6	8	9	10	10	9	7
Temperatura media del aire (°C)	29	29	29	29	30	30	30	31	32	32	32	31	30

### 2.1.5.3. Caracterización de la arborización urbana de la ciudad de Macapá

De acuerdo con Tostes (2017), debido al buen número de lotes con grandes dimensiones (15 por 30 metros y otros de 20 por 50 m), posibilitaron que los ciudadanos plantasen en sus patios todo tipo de árbol fructífera, la influencia para la plantación de esas especies está relacionado con las tradiciones de las familias oriundas de ciudades del estado de Pará.

En relación a las vías públicas de la ciudad de Macapá, básicamente están presentes la implementación de árboles fructíferos, especialmente las de mango, que aquí en Brasil son más conocida como mangueiras. Castro, Dias, & Amanajás (2016), señala que las especies más encontradas en su gran mayoría son de especies fructíferas, siendo en primer lugar el árbol de especie *Mangifera indica* L con una frecuencia relativa en la ciudad de 26.39% (Tabla 10).

Tabla 10: Frecuencia relativa de la especie *Mangifera indica* L. en la ciudad de Macapá.

Fuente: Castro, Dias & Amanajás, 2016.

N. Ord	NOME CIENTIFICO	NOME VULGAR	FRECUENCIA ABSOLUTA	FRECUENCIA RELATIVA (%)
1	<i>Mangifera indica</i> L.	Mangueira	552	26,39
2	<i>Ficus benjamina</i> l.	Ficus	392	18,74
3	<i>Syzygium malaccense</i> L.	Jambeiro	257	12,28
4	<i>Andira inermis</i> (W. Wright)	Alvineira	142	6,79
5	<i>Roystonea oleraceae</i> (Jacq.)	Palmeira Imperial	119	5,69
6	<i>Anacardium occidentale</i> L.	Cajueiro	80	3,82
7	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.)	Oitizeiro	76	3,63
8	<i>Cocus nucifera</i> l.	Coqueiro	58	2,77
9	<i>Terminalia catappa</i> L.	Castanholeira	39	1,86
10	<i>Psidium guajava</i> L.	Goiabeira	35	1,67
11	<i>Cycas</i> sp	Palmeira Cica	35	1,67
12	<i>Euterpe oleraceaea</i> Mart.	Açaizeiro	34	1,63
13	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A. Howard	Palheteira	31	1,48
14	<i>Prunus</i> L.	Ameixeira	28	1,34
15	<i>Carica papaya</i> L.	Mamoeiro	26	1,24
		Outras	188	9,01
<b>TOTAL</b>			<b>2.092</b>	<b>100,00</b>

Con la evolución de la ciudad, el crecimiento de la población y el apareamiento de nuevas edificaciones, el cuidado con las áreas verdes fue olvidado, ocasionando en la falta de mantenimiento o en la mutilación de estas. La falta de cuidado del poder público con la preservación y mantenimiento de esos árboles, ocasionaron daños en la morfología de la ciudad y en el confort térmico urbano por la falta de áreas sombreadas en las vías urbanas.

Como dicho anteriormente, la predominancia de arborización urbana en su mayoría son especies fructíferas en el contexto urbano. La implementación de ese tipo de árbol es muy atractiva para la avifauna, entretanto se debe evitar el plantío de esas especies en veredas, ya que esos frutos pueden ocasionar prejuicios a la ciudad, trayendo molestias en el desplazamiento de las personas.

Lima (1993), enumera algunos de los principales problemas de ese tipo de arborización:

- Oscurecimiento diurno y nocturnos de calles, jardines y fachadas de las casas;
- Obstrucción de canales y rompimiento de tejas;
- Calles, veredas y propiedades con el piso destruido;
- Caídas de hilos de la red eléctrica y telefonía;
- Prejuicio de las placas de señalización, semáforos, tránsito de vehículos y peatones;
- Encubrimiento de letreros y propagandas comerciales.

Como se puede percibir en una noticia de un periódico de la ciudad de Macapá G1<sup>3</sup>, los ciudadanos macapaenses reclaman por los perjuicios causados por las caídas de los mangos en la vía pública de la ciudad, generando daños en vehículos y accidentes con personas (Figura 28).

---

<sup>3</sup> Macapá G1 – Noticiero de la ciudad de Macapá - <http://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2015/04/macapaenses-reclamam-de-prejuizos-causados-pela-queda-de-mangas.html>



Figura 28: Macapenses reclamam de los prejuicios ocasionados por la queda de mangos.

Fuente: G1 Macapá.

El género *Mangifera* abarca un gran número de especies, siendo que apenas la *Mangifera indica* L. es la que se destaca en la calidad de sus frutos y expresión de cultivo en los trópicos y se caracteriza por un gran porte y con muchas hojas verdes lineares. Originarias del sur de Asia, la mangueira se dispersó por todos los continentes, siendo cultivada actualmente, en todos los países de clima tropical y subtropical (OLIVEIRA, 2009).

Las características físicas de la especie *Mangifera* L. indica son las siguientes y pueden ser observadas en la tabla 11 a seguir:

Tabla 11: Características físicas del mango. Fuente: EMBRAPA, 2010.

<b>CARACTERISTICAS FISICAS</b>	
Altura del árbol	8.48 metros
Altura del fuste	1.70 metros
Diámetro del tronco	48 centímetros
Color del tronco	Marrón claro
Rugosidad del tronco	Baja
Diámetro de la copa	Alta
Longitud de la hoja	30 centímetros
Ancho de la hoja	5.5 centímetros
Color de la hoja	Verde oscuro



Entretanto en un levantamiento realizado por el IBGE en 2010, fue calculado el porcentaje de arborización presente en las capitales brasileñas. Para la sorpresa del levantamiento se observó que la región norte, conocida como el pulmón verde del mundo, por poseer la vegetación amazónica, es la región que menos presenta arborización urbana en las ciudades.

Los casos más significativos son de la ciudad de Manaus y Belém, según el IBGE son los municipios con el menor porcentual: Belém registró 22.4% y Manaus con 25.1%. Entretanto, en regiones con mayores densidades poblacionales y del uso del suelo presentaron mayores índices de arborización, como es el caso de la ciudad de Goiania con un índice 89.5%.

La ciudad de Macapá en levantamiento realizado por el IBGE 2010, cuenta con 66.2% de arborización urbana, sin embargo, el porcentaje aún es bajo en consideración de otras ciudades brasileñas (Tabla 12).

Tabla 12: Datos del porcentaje de arborización urbana en la ciudad de Macapá. Fuente: IBGE, 2010.

<b>Unidad de la Federación</b>	<b>Municipio</b>	<b>Porcentaje de arborización</b>
AMAPÁ	MACAPÁ	66.2 %

#### 2.1.5.4. Caracterización y análisis física de la Avenida Leopoldo Machado

La realización de esta investigación se dio en la Avenida Leopoldo Machado que está localizada en la ciudad de Macapá. Esta avenida se caracteriza por poseer una gran extensión y conectar el hemisferio norte con el hemisferio sur de la ciudad, desde la Avenida Rio Grande del Norte hasta la Rodovia Juscelino Kubstichek. Para poder entender su extensión, se realizó la medida métrica con la herramienta Google Earth, donde se pudo observar que la avenida cuenta con una extensión de aproximadamente 5km (Figura 29).

La elección de esta avenida como área de estudio, se dio debido a la alta concentración de personas que circulan y por sus características morfológicas, que permitieron hacer el análisis de tres puntos de medición referente a la arborización y pavimentación empleada durante el recorrido. Esos tres puntos fueron considerados y medidos de acuerdo a la densidad de árboles que se encuentran en la avenida y por el material presente en el suelo urbano, que no son constantes, imposibilitando que las personas puedan desplazarse con el debido confort térmico (Figura 30).

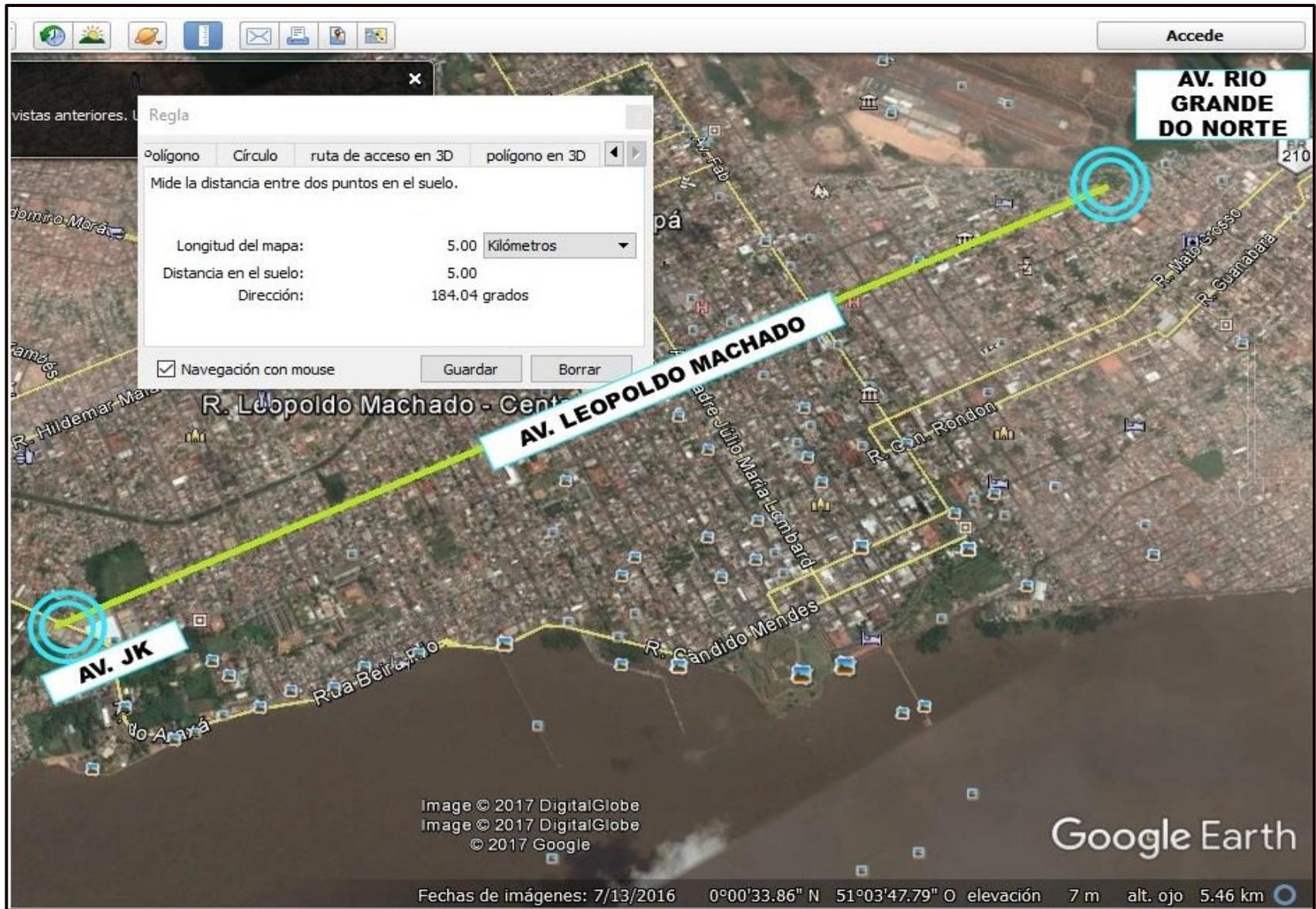


Figura 29: Extensión de la Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.



Figura 30: Trayectoria y puntos de medición en la Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.

Durante el trayecto, se observó que la presencia de arborización no es constante en todo su tramo, hay puntos donde la densidad arbórea se presenta y otros puntos donde prácticamente es inexistente.

A seguir, se presenta un cuadro resumen a respecto de los puntos de intensidad de arborización urbana, clasificadas en: área con bastante arborización urbana, área parcialmente arborizada y poco arborizada (ver Figura 31).



Figura 31: Puntos de intensidad de arborización urbana – Av. Leopoldo Machado. Fuente: Google Earth, adapt. La autora, 2017.

En el punto n°1, donde no hay presencia de arborización, las personas no transitan durante el día y si lo hacen utilizan medios para poder adaptarse al clima, como el uso de paraguas, la utilización de transporte urbano para protegerse de los rayos solares. También se pudo percibir la

utilización de los materiales en la pavimentación, que son de asfalto en la vía urbana y concreto en la vereda (Figura 32). Como mencionado en el marco teórico, ese contexto en la morfología de la ciudad hace con que se generen islas de calor urbano, elevando más aún las temperaturas



Figura 32: Punto n°1, sin presencia de arborización - Av. Leopoldo Machado.

Fuente: La autora, 2017.

En el punto de medición n°2 con regular arborización, se pudo percibir que la arborización urbana esta predominante solamente de un lado de la avenida, haciendo con que los transeúntes prefieran transitar en el lado arborizado. Como se puede observar en la Figura 33, no hay presencia de sombras proporcionadas por los árboles para que las personas puedan caminar con el confort térmico adecuado.



Figura 33: Punto nº 2, con regular arborización – Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.

En el punto nº3, donde si presentan una densidad arbórea mayor, se pudo constatar un mayor número de presencia de personas, posibilitando su desplazamiento debido a la ocurrencia de sombra generadas por la arborización (Figura 34). Por lo tanto, la presencia de arborización urbana es fundamental para proporcionar confort térmico urbano, especialmente en ciudades con temperaturas elevadas.



Figura 34: Punto n°3 con abundante arborización – Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.

## 2.2. DEFINICIONES DE TÉRMINOS UTILIZADOS

**Confort Térmico:** Sensación de bienestar en lo que se refiere a temperatura. Y es determinado por las siguientes variables ambientales: Temperatura del aire, radiación solar; humedad relativa del aire y velocidad del viento;

**Clima:** Conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmosfera, queda determinado por los factores climáticos.

**Espacio Público:** Segundo Schjetnan et al. (2008), el conjunto de espacios que el ser humano utiliza para sus actividades constituye lo que se denomina espacio vital. Este espacio vital está

dividido en tres tipos de espacios de acuerdo al grado de aproximación que se permite entre los seres humanos. Que son: Espacio íntimo o individual, espacios semipúblicos y públicos que son espacios donde el encuentro o el convivio entre los integrantes de una comunidad se da de manera indiscriminada.

**Sistema Vial:** El sistema vial posee grande relevancia dentro de los sistemas urbanos, pues representa 50% de los costos de urbanización, ocupa una parcela importante de suelo urbano (entre 20 y 25%), y una vez implantado, es el subsistema que tiene más dificultad para aumentar su capacidad, por el suelo que ocupa, los costos que envuelve y de las dificultades operativas que su alteración crea (Medeiros, 2006).

**Clima urbano:** Borges (2006) cita que es importante conocer los estudios científicos sobre el clima urbano que tuvieron inicio por el siglo XIX en Europa, con el trabajo de Luke Howard, sobre el clima de la ciudad de Londres, publicado por la primera vez en 1818, en cual se observó que la temperatura del aire es frecuentemente más alta en la ciudad que en el entorno del área rural.

**Conductividad térmica:** Es el flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de un grado Kelvin por metro. Se expresa en W/mk o W/m°C.

**Bienestar térmico:** Conjunto de condiciones interiores de temperatura, humedad y velocidad del viento establecidas reglamentariamente, que se considera producen una sensación de satisfacción con el acondicionamiento térmico ambiental.

**Transmitancia Térmica:** Flujo de calor por grado de temperatura entre dos ambientes isotermos y por unidad de superficie de una de las caras isotermas, que separa ambos ambientes.

**Albedo:** Es una medida relativa de la cantidad de luz reflejada, o sea, una medida de reflexión de la superficie de un cuerpo.

**Amplitud térmica:** Diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas registradas en determinado local, en un cierto periodo de tiempo.

**Porosidad:** Es representada por la mayor o menor permeabilidad de una estructura urbana al pasaje de los vientos expresa por medio de espacios entre edificaciones y o arreglos morfológicos, diversidad de altura de la edificaciones y índice de fragmentación de las áreas construidas.

**Rugosidad:** Característica urbana que expresa la influencia de las diferentes alturas de las edificaciones sobre el flujo de aire. Según Brandão (2009), la rugosidad de las superficies es definida como la altura en que la velocidad del viento es igual a cero.

**Tiempo de interacción:** Tiempo necesario para las sucesivas simulaciones promovidas por el modelo, en este caso de estudio, la técnica que el modelo interno del ENVI-met utiliza para calcular los resultados de simulaciones.

**Humedad:** Se refiere al estudio de la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la cantidad de vapor en aire saturado a la misma temperatura.

**Arborización Urbana:** Se entiende por arborización urbana toda cobertura vegetal de porte arbóreo existente en las ciudades. Esa vegetación ocupa, básicamente, tres espacios distintos: las áreas libres de uso público y potencialmente colectivo, áreas libres particulares y áreas acompañando el sistema viario.

**Bioclimatismo:** La arquitectura bioclimática puede definirse como la arquitectura diseñada sabiamente para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético. Para

ello aprovecha las condiciones climáticas de su entorno, transformando los elementos climáticos externos en confort interno gracias a un diseño determinado.

## **2.3. HIPÓTESIS**

### **2.3.1. Hipótesis General:**

La arborización urbana y el material de pavimentación influyen de manera significativa en el confort térmico urbano en la avenida Leopoldo Machado, 2017.

### **2.3.2. Hipótesis Específicas:**

- El material utilizado en la pavimentación influye en la temperatura del suelo.
- La densidad de la arborización influye en la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.
- La densidad de la arborización influye en los índices de confort (PMV).
- La densidad de la arborización influye en los índices de desconfort (PPD).

## **2.4. VARIABLES**

Las variables relacionadas a los datos observados y variables relacionada a las simulaciones numéricas, son descritas a seguir:

### **2.4.1. Variables relacionadas a los datos observados**

A1. Variable independiente: tipo de pavimentación.

A2. Variable dependiente: temperatura del suelo.

B1. Variables independientes: densidad arbórea.

B2. Variables dependientes: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, confort térmico

#### **2.4.2. Variables relacionadas a las simulaciones numéricas**

C1. Variables independientes: densidad arbórea, velocidad del viento a 10 metros de altura, temperatura inicial de la atmosfera, temperatura potencial a 2500 metros, humedad específica en el topo del modelo a 2500 m y humedad relativa a 2m.

C2. Variables dependientes: índice de confort PMV, índice de disconfort PPD, temperatura del suelo, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire.

### **3. CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Diseño de investigación**

La presente investigación es clasificada como experimental, apoyada por la coleta de datos de campo y simulación computacional, en donde la arborización y pavimentación fueron estudiadas en la influencia que tendrían en el confort térmico urbano.

La investigación tuvo dos etapas: La primera etapa consistió en la medición de datos de las variables micro climáticas mediante uso de aparatos meteorológicos portátiles en tres puntos diferentes de medición, como temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento, y la temperatura superficial del material presente en la pavimentación. Esas mediciones fueron realizadas en diferentes horarios durante las 24 horas del día, en el día 20 de julio, entendiendo como la arborización y pavimentación influyen en el confort térmico urbano en el escenario real encontrado.

La segunda etapa consistió en la simulación computacional mediante la herramienta ENVI-met 4.0, que consiste en un programa de simulación computacional micro climática empleada para la comprensión de los fenómenos relacionados al clima urbano antes de su implementación. Esa herramienta permitió crear escenarios hipotéticos, verificando la influencia de la arborización y la pavimentación en áreas con total presencia de vegetación y con ausencia de vegetación. Además, la simulación nos permitió entender el comportamiento de los índices de confort y discomfort en el medio urbano en análisis. Además, la simulación nos permitió entender también los índices de confort y discomfort en el medio urbano en análisis. En la Tabla A1 del APÉNDICE A se presenta

la matriz de consistencia que permite analizar con mejor claridad el grado de coherencia entre los objetivos, problemas, hipótesis, variables y el tipo de metodología empleada.

### 3.2. Población y muestra

Población: Es constituida por las variables micro climáticas en la Avenida Leopoldo Machado.

Muestra: Es constituida por las variables micro climáticas en tres puntos de medición en la Avenida Leopoldo Machado.

#### 3.2.1. Diseño muestral

En la Avenida Leopoldo Machado se llevó a cabo la selección de tres puntos de medición con diferentes densidades arbóreas durante el tramo, siendo clasificadas como: con presencia de arborización, regular presencia de arborización y sin ausencia de arborización y su influencia en la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento (Figura 35). Al mismo tiempo se analizó el tipo de material presente en la avenida y su influencia en la temperatura superficial del suelo en el contexto urbano.



Figura 35: Disposición, densidad y clasificación de arborización. Fuente: Labaki & Santos, 1995.

### **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

#### **3.3.1. Técnicas**

La metodología propuesta permite comparaciones entre los datos reales e hipotéticos validados mediante mediciones in loco y uso de la herramienta de simulación computacional micro climático para el área de estudio. Las mediciones de las variables climáticas (temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento) in loco realizados en los tres puntos de medición (sin arborización, con arborización y ausencia de arborización sumados a la presencia de materiales en la pavimentación), permitieron identificar como influyen en el confort térmico urbano.

En seguida se hizo uso del software de simulación computacional, el cual permitió crear escenarios hipotéticos en la vía urbana, ya que no sería factible retirar o acrecentar árboles en el escenario real. Por lo tanto, se prosiguió al análisis de los datos encontrados in loco y al análisis de los resultados de los datos obtenidos por la simulación.

Los registros de valores de los elementos climáticos fueron realizados en diferentes horarios tales como: 06:00h, 09:00h, 12:00h, 15:00h, 18:00 y 21:00h en condiciones de cielo claro. Esos horarios han sido escogidos por ser recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La observación de los fenómenos meteorológicos debe ser realizada con instrumentos de lectura directa o mediante instrumentos registradores. Las lecturas pueden ser sistémicas, o sea estandarizadas en el tiempo, en la red oficial de Brasil las lecturas deben ser realizadas a las 09:00, 15:00 y 21:00 horas de Brasilia, que corresponde a las 12:00, 18:00 y 24:00 GMT (ALVES, 2016).

### 3.3.2. Instrumentos

Fueron utilizadas herramientas como aparatos meteorológicos portátiles para la realización de las mediciones de las variables climáticas del objeto de estudio y la utilización del software ENVI-met para la simulación micro climática en la Avenida Leopoldo Machado. También fueron utilizadas herramientas para el registro visual, como el uso de cámara fotográfica.

Las mediciones de las variables climáticas se dieron mediante un conjunto de aparatos meteorológicos portátiles que serán descritos a seguir:

- Anemómetro con registro de temperatura;
  - Termo Higrómetro;
  - Termómetro infrarrojo;
- 
- Anemómetro con registro de temperatura

El anemómetro ha sido utilizado para la medición de la velocidad del viento, así como su temperatura. El aparato utilizado ha sido de la marca HIGHMED, modelo HM-383, es un equipamiento resistente de alta sensibilidad y precisión, su unidad de aplicación utilizada ha sido metros por segundo (m/s), con resolución de 0,001.

El HM-383 posee un sensor en formato de hélice donde su eje tiene un rubí de alta durabilidad, de manera a proporcionar mediciones con gran precisión y estabilidad. (Figura 36). El aparato también tiene un data Logger, lo que permite la conservación de los datos de medición.



Figura 36: Anemómetro – HM-383. Fuente: La autora, 2017.

- Termo Higrómetro

La humedad relativa del aire ha sido medida con un termo higrómetro de la marca ICEL MANAUS, del modelo HT- 4000 (Figura 37). Es un termo higrómetro con Data Logger que puede almacenar hasta 32.000 mil lecturas y transferirlas mediante una conexión USB. Ha sido desarrollado con lo que existe de más moderno en tecnología de semiconductores, lo que proporciona una alta exactitud, durabilidad y simplicidad de operación.



Figura 37: Termo Higrómetro del Modelo HT – 4000. Fuente: La autora, 2017.

Especificaciones importantes:

- Funciones: Temperatura, humedad relativa, punto de rocío.
- Ciclo de medición: de 2s a 24 h
- Temperatura de operación: - 40°C a + 70°C
- Unidad de operación: 0% a 100%

- Termómetro Infrarrojo

Para los valores de las temperaturas superficiales de la pavimentación, ha sido utilizado un termómetro infrarrojo de la Marca Dual Laser, del Modelo HT-817 (Figura 38). El tiempo de respuesta del aparato es de 0.15 s como máxima.



Figura 38: Termómetro Infrarrojo HT-817. Fuente: La autora, 2017.

Especificaciones importantes:

- Rango de medición: -50 a + 650 Grados C;
- La emisividad: regulable 0.1 – 1;
- Tiempo de respuesta: 0.15s;

- ENVI- met 4.0

La herramienta ENVI- met,<sup>4</sup> es un software que viene siendo empleado en muchas investigaciones científicas sobre la simulación micro climática del espacio urbano. El sistema ha sido desarrollado por Michael Bruse (Institute of Geography, Department of Geoinformatic, Environmental Modeling Group, University of Mainz) con el objetivo de poder simular la interacción entre superficies – arborización – aire en un entorno urbano (BRUSE, 2014).

Este modelo computacional es bastante eficiente en los estudios de confort térmico y en otras áreas como estudios de climatología urbana, arquitectura, diseño de predios o planeamiento ambiental, entre otros y por las facilidades de empleo en situaciones reales cuanto hipotéticas. Sirve como herramienta para el análisis de distintas variables, tales como: atmosfera, sistema del suelo, vegetación, superficies y biometereologicas.

El modelo ENVI-met permite evaluar el microclima de una determinada área que sufre de influencias de condiciones climáticas, tales como radiación solar, orientación de los vientos y humedad del aire. Posibilita también evaluar el comportamiento de los materiales existentes en edificios y calles, analizar la dispersión de contaminantes y determinar el flujo de calor entre los materiales. (Shinzato, 2009)

---

<sup>4</sup> El modelo computacional puede ser encontrada en el siguiente link: <http://www.envi-met.com/#section/intro>

A seguir en la Figura 39 se presenta un esquema de factores analizados por el software ENVI-met:

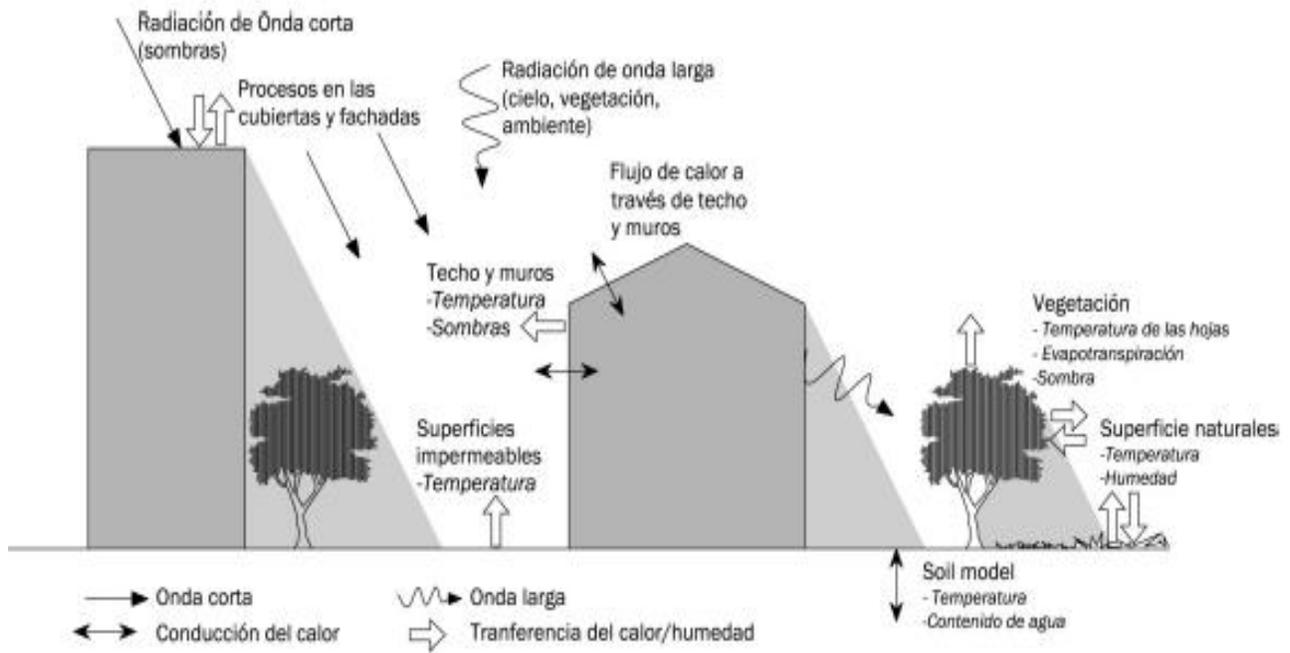


Figura 39: Factores analizados por el ENVI-met. 4.0. Fuente: Bruse, 2014.

Dentro de todas esas posibilidades, en esta investigación se han analizado los factores como arborización, pavimentación, analizando datos como la temperatura, humedad, velocidad del aire. Entretanto para la aplicación del modelo se necesita datos de entrada y la selección de datos de salida, que consiste en un proceso de modelaje (Figura 40).



Figura 40: Proceso de modelaje en el software ENVI-met. Fuente: SILVA, 2009.

### 3.4. RECOLECCIÓN DE DATOS

Esta investigación posee dos fases bien distintas para el proceso de recolección de datos, que llevan consigo la observación directa e indirecta para la obtención de los resultados.

La recopilación se ha dado de la siguiente manera:

I. Análisis Meteorológico:

Recopilación de datos meteorológicos, medición y análisis de las variables micro climáticas.

II. Simulación de desempeño térmico:

Simulación computacional con el software ENVI-met.

III. Análisis de Resultados:

Conclusión de Resultados y directrices.

En detalles se realizaron los siguientes procedimientos metodológicos:

1. Revisión bibliográfica.
2. Escoger las áreas de estudio y caracterización de acuerdo con las características compatibles con el software a ser empleado (ENVI-Met 4.0).
3. Levantamientos: Monitorización de datos climáticos locales por medio de instrumentos meteorológicos y obtención de datos climáticos por institutos de investigaciones meteorológicas, como el IMMET (Instituto Meteorológico) y INPE (Instituto Nacional de Pesquisa).

4. Testes previos de simulación computacional con el software ENVI-met para aprendizaje, verificación de los datos de entrada y formato de resultados obtenidos.
5. Organización y preparación de los datos de entrada para las simulaciones realizados con los softwares.
6. Simulaciones de la situación hipotética con el software ENVI-met.
7. Análisis de los resultados obtenidos en el levantamiento de análisis meteorológicos obtenidos por simulaciones.
8. Análisis general de los resultados.
9. Conclusiones y recomendaciones

## **4. CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. RESULTADOS**

Presentamos dos tipos de resultados, el primer tipo se refiere a las mediciones de campo de la temperatura del aire, temperatura de la superficie del suelo, humedad relativa del aire y velocidad del viento. El segundo tipo de resultado se refiere a simulaciones numéricas de escenarios con diferentes tipos de densidad arbórea con el uso del software ENVI-met 4.0.

#### **4.1.1. Mediciones de campo**

Para las mediciones de campo, fueron utilizados aparatos portátiles de medición, tales como: anemómetro, termohigrómetro y el termómetro infrarrojo. Esos instrumentos son importantes ya que con ellos se puede entender mejor las variables de clima del ambiente externo y consecuentemente entender el confort térmico del ambiente urbano.

Fueron escogidos tres puntos, en la Avenida Leopoldo Machado, para las mediciones de variables climáticas. Esos tres puntos (Figura 41) se caracterizan por poseer diferentes densidades arbóreas y son denominados como P1, P2 y P3,

- Punto P1: es un punto de la Avenida Leopoldo Machado donde no se observan árboles, correspondiente al punto rojo superior en la Figura 41;
- Punto P2: es un punto de la Avenida Leopoldo Machado donde se observa regular arborización, correspondiente al punto rojo intermediario en la Figura 41;
- Punto P3: es un punto de la Avenida Leopoldo Machado donde se observa abundante arborización, correspondiente al punto rojo inferior en la Figura 41.

Las mediciones en esos tres puntos fueron todos realizadas en el día 20 de julio de 2017 en la ciudad de Macapá, en el fuso horario de Brasilia: 06:00, 09:00, 12:00; 15:00 y 21:00.



Figura 41: Puntos de medición- Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.1.1. Resultados de la temperatura superficial del suelo

La influencia de la pavimentación en el confort térmico urbano es analizada mediante el uso de un termómetro infrarrojo, que permite indicar valores referentes a la temperatura superficial del suelo. Los materiales considerados en la pavimentación son el asfalto utilizado en calles y avenidas, el cemento o concreto usado en las veredas y la tierra alrededor de las arboles, siendo que estas mediciones fueron realizadas en los puntos P1, P2 y P3.

En la Figura 42, se presenta la comparación temporal entre las mediciones de la temperatura superficial en el asfalto y en la vereda en el punto P1, la radiación solar incidente es intensa en este punto debido a la ausencia de vegetación. Se observa que:

- la amplitud de la temperatura superficial varía de 29.1°C a 60.0°C en el asfalto y de 28.6°C a 58.6°C en la vereda, siendo que en ambos tipos de pavimento la temperatura mínima es a las 06:00 horas y la temperatura máxima es a las 15:00 horas;
- en todos los horarios observados la temperatura en el asfalto es siempre mayor que la temperatura en la vereda, siendo esta diferencia máxima de 4.8°C a las 09:00 horas;
- la diferencia entre la temperatura del asfalto y la vereda es mínima a las 06:00 horas con 0.5°C y a las 21:00 horas con 0.4°C, horarios donde no hay radiación solar;

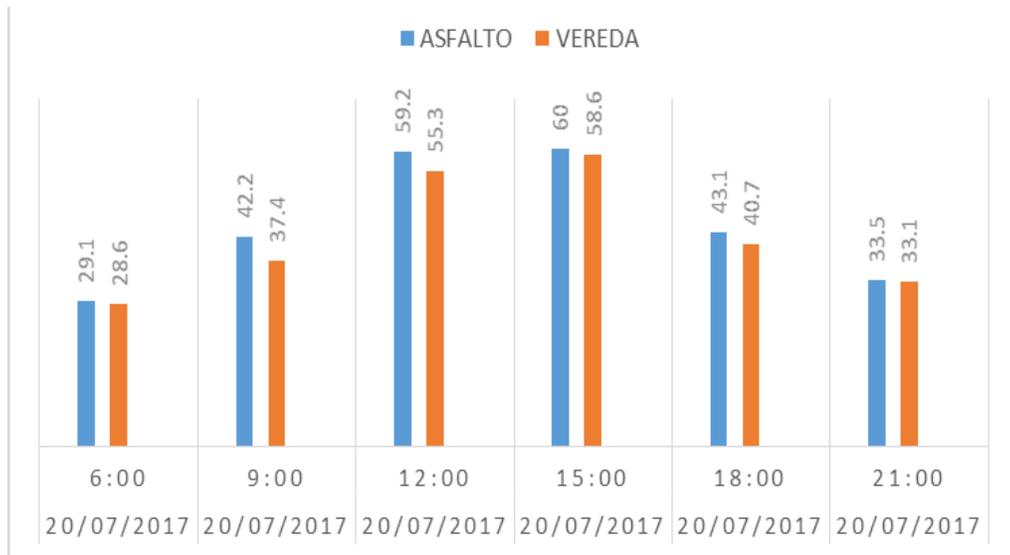


Figura 42: Temperatura de la superficie del suelo en el punto P1 - sin arborización.

Fuente: La autora, 2017.

Introducimos ahora un factor de reducción de la incidencia de rayos solares, lugares con regular y bastante arborización (puntos P2 y P3 respectivamente), para analizar el efecto de la arborización en la temperatura superficial.

En la Figura 43, se presenta la comparación temporal entre la temperatura superficial en el asfalto, vereda y en la tierra ubicada en la base de los árboles para el punto P2, lugar con regular arborización. Se observa que:

- la amplitud de la temperatura superficial varía entre 29.8°C a 58.1°C en el asfalto, entre 27.4°C a 47.9°C en la vereda y entre 26.4°C a 47.5°C en la base de los árboles;
- en todos los horarios de comparación, la temperatura superficial en el asfalto es mayor que la temperatura superficial en la vereda y esta última es mayor que la temperatura superficial en la base de los árboles;
- se observa una mayor diferencia entre la temperatura superficial del asfalto y de la base de los árboles a las 15:00 horas con diferencia de 20.5°C;
- entre el asfalto y la vereda se observa una diferencia máxima de temperatura superficial del suelo de 15.9°C a las 15:00 horas;
- entre la vereda y la base de los árboles la diferencia máxima es de 4.6°C a las 15:00 horas.

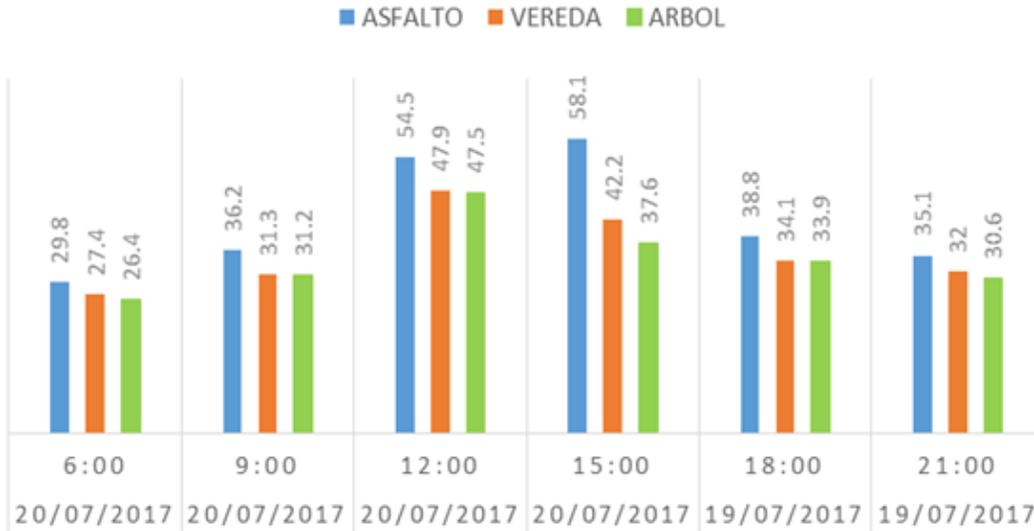


Figura 43: Temperatura de la superficie del suelo – regular arborización. Fuente: La autora, 2017.

En la Figura 44, se presenta la comparación temporal entre las temperaturas en el asfalto, vereda y base de los árboles en el punto P3, lugar con abundante vegetación. Se observa, que:

- la amplitud de la temperatura superficial del suelo varía de 27.6°C a 37.1°C en el asfalto, de 26.2°C a 34.8°C en la vereda y de 26.0°C a 32.3°C, siendo que las temperaturas mínimas acontecen a las 06:00 horas y las máximas a las 12:00 horas., con excepción de la temperatura en la vereda que ocurre a las 09:00 horas.
- en todos los horarios de comparación, la temperatura superficial en el asfalto es mayor que la temperatura superficial en la vereda y esta última es mayor que la temperatura superficial en la base de los árboles;
- se observa una mayor diferencia entre las temperaturas del asfalto y de la base de los árboles a las 09:00 horas con diferencia de 5.8°C;

- entre el asfalto y la vereda se observa una diferencia máxima de temperatura de 4.0°C a las 12:00 horas;
- entre la vereda y la base de los árboles la diferencia máxima de temperatura es de 3.8°C a las 09:00 horas.

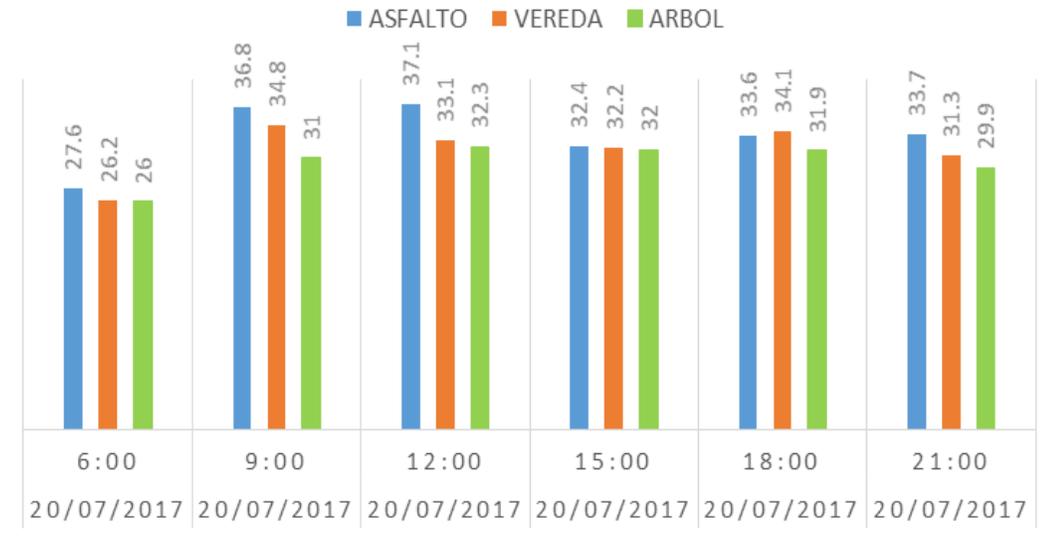


Figura 44: Temperatura de la superficie del suelo – abundante arborización

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.1.2. Resultados de la temperatura del aire

La temperatura del aire fue medida con un anemómetro digital con medición de temperatura en los horarios de 06:00 a 21:00, con intervalos de 3 horas, en el día 20/07/2017. La temperatura del aire fue medida en los puntos P1, P2 y P3, cada una con diferente densidad de arborización.

Los resultados de las mediciones de la temperatura del aire son presentados en la Tabla 13, de la cual podemos observar:

- en los tres puntos de observación las temperaturas máximas se dan entre las 12:00 y 15:00 horas, coincidiendo con los horarios de mayor radiación solar;
- en los tres puntos de observación las temperaturas mínimas se dan a las 06:00 y 21:00 horas, coincidiendo con horarios de menor radiación solar;
- la amplitud de la temperatura del aire varia de 26.1°C a 35.1°C en el punto sin arborización, de 25.8°C a 33.6°C en el punto con regular arborización y de 25.5°C a 32.2°C en el punto con abundante arborización;

Tabla 13: Temperatura del aire (°C) medida en 20/07/2017. Fuente: La autora, 2017.

	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	Temperatura del aire máxima
Sin arboles	26.1	31.2	34.0	35.1	29.4	28.5	35.1
Regular arborización	25.8	29.5	32.4	33.6	29.5	28.5	33.6
Abundante arborización	25.5	29.1	32.1	32.2	29.5	28.4	32.2

#### 4.1.1.3. Resultados de la humedad relativa del aire

Para poder obtener los datos de humedad del aire, se utilizó del aparato de medición denominado termohigrómetro. El aparato también hace las mediciones de temperatura del aire, humedad del ambiente y punto de rocío, entretanto solamente los datos de la humedad relativa del aire son considerados, ya que la temperatura del aire ya fue medida usando el anemómetro digital con medición de temperatura.

Las mediciones de la humedad relativa del aire (en %) fueron realizadas en el día 20 de julio de 2017, en los horarios 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, y 21:00 horas, siendo que la altura utilizada para medición fue de 1.50 m.

En la Tabla 14, se muestran los datos de la humedad relativa media del aire (en %) para los tres puntos de medición con diferente densidad arbórea, de la cual se puede observar:

- la amplitud de las medidas de la humedad relativa del aire varía entre 71.4% a 81.8% en el ponto sin arborización, de 72.9% a 82.4% en el punto con regular arborización y de 72.1% a 81.2% en el ponto con abundante arborización;
- la media diaria de la humedad relativa es de 76.5% en el ponto sin arborización, de 77.2% en el punto con regular arborización y de 77.8% en el punto con abundante arborización;
- los mayores valores de la humedad relativa ocurren en el periodo nocturno y disminuyen en el transcurso del día con el aumento de la radiación solar.

Tabla 14: Humedad relativa media del aire (%), medida en 20/07/2017. Fuente: La autora, 2017.

	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	Humedad media (%)
Sin arboles	81.8	78.2	75.9	72.4	71.4	79.3	76.5
Regular arborización	82.4	77.6	72.9	76.3	72.6	81.2	77.2
Abundante arborización	81.2	81.0	75.4	75.9	72.1	81.1	77.8

#### 4.1.1.4. Resultados de la velocidad del viento

La velocidad del viento fue medida con un anemómetro digital en los horarios de 06:00 a 21:00, con intervalos de 3 horas, en el día 20/07/2017. La velocidad del viento fue medida en los puntos P1, P2 y P3, cada una con diferente densidad de arborización.

Los resultados de las mediciones de la velocidad media del viento son presentados en la Tabla 15, de la cual podemos observar:

- la amplitud de la velocidad del viento es de 1.20 m/s a 1.88 m/s para el punto sin arborización, de 0.96 m/s a 1.63 m/s para los puntos con regular arborización y de 1.11 m/s a 1.37 m/s para los puntos con abundante arborización;
- la media de la velocidad del viento en el día de medición es de 1.48 m/s para el punto sin arborización, de 1.32 m/s para el punto con regular arborización y de 1.24 m/s para el punto con abundante arborización;
- las mayores velocidades del viento son observadas entre las 12:00 a las 18:00 horas para el punto sin arborización;

Tabla 15: Velocidad media del viento (m/s), medida en 20/07/2017. Fuente: La autora, 2017.

	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	Velocidad media (m/s)
Sin arboles	1.20	1.21	1.55	1.76	1.88	1.57	1.48
Regular arborización	0.96	1.41	1.54	1.63	1.34	1.04	1.32
Abundante arborización	1.28	1.18	1.18	1.11	1.36	1.37	1.24

#### 4.1.2. Simulaciones numéricas con el software ENVI-met

Para obtener los resultados de las simulaciones numéricas de escenarios hipotéticos con el ENVI-met 4.0, es necesario primero realizar la configuración y luego describir el procedimiento para ejecutar las simulaciones.

##### 4.1.2.1. Archivo de configuración

En el ENVI-met 4.0 es necesario crear un archivo de configuración del modelo con extensión. SIM. La configuración es realizada en el editor *ConfigWizard*, como muestra la Figura 45.

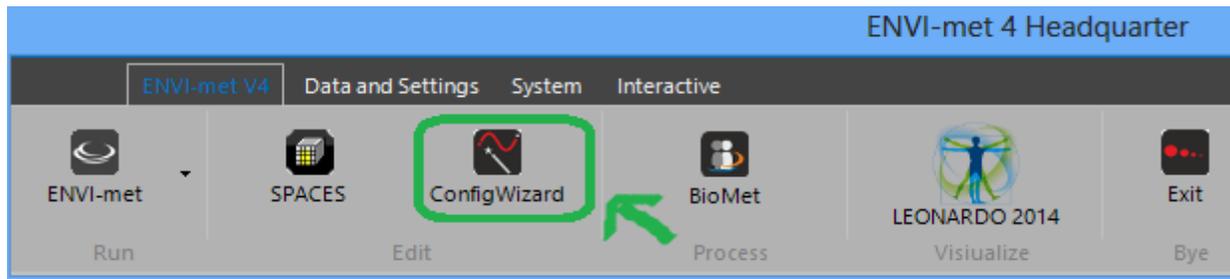


Figura 45: Editor ConfigWizard. Fuente: ENVI-met 2017.

Los procedimientos de configuración son los siguientes:

- Clicando en el ambiente *ConfigWizard* se abre una ventana con las opciones para completar los datos de entrada, como muestra la Figura 46. Se abrió un nuevo archivo en *New* y el editor permite completar los datos para cada una de las opciones mostradas a la izquierda de la Figura 46.

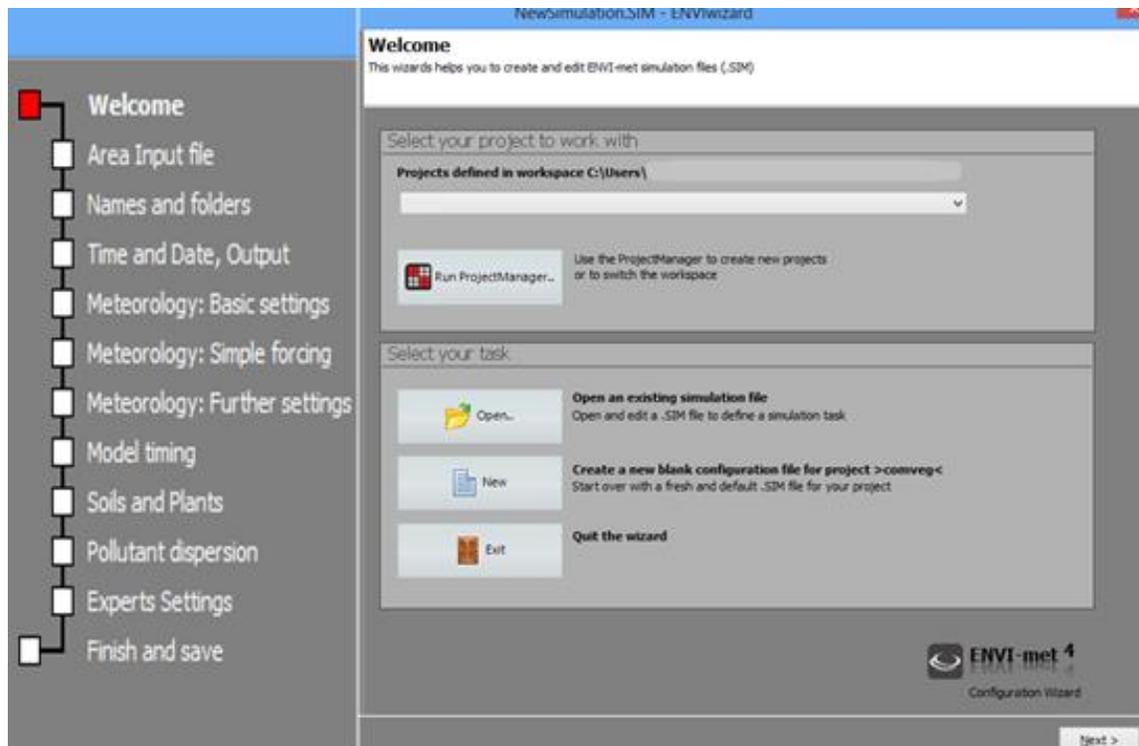


Figura 46: Ventana ConfigWizard con las opciones de configuración a ser completadas.

Fuente: La autora, 2017.

- En *Área Input file*, se debe seleccionar el archivo con extensión .INX de la configuración del área modelada, la cual contiene la altura de casas y edificios, tipos de suelo y vegetación.
- En *Names and Folders*, se define el nombre del archivo con extensión .SIM y el directorio donde va a estar alojado el archivo, usualmente se elige el mismo directorio del archivo con extensión .INX.
- En *Time and Date, Output*, se define el tiempo de duración de la simulación y el periodo de tiempo en que los archivos son guardados, en este caso tenemos:
  - Start Date (DD.MM.YYYY): 20.07.2017
  - Start Time (HH: MM: SS): 03:00:00
  - Total Simulation Time (h): 30

- Receptors and buildings (min): 60
- All other files (min): 60
- El periodo de simulación es de 30 horas, con inicio a las 03:00 GMT del día 20/07/2017 y con fin a las 09:00 GMT del día 21/07/2017, lo que equivale en el horario de Brasilia a simular el período con inicio a las 00:00 horas del día 20/07/2017 a las 06:00 horas del día 21/07/2017. Los archivos de salida son criados y guardados a cada hora de simulación.
- En Meteorology: Basic Settings: se define la velocidad del viento a 10 metros de altura, la temperatura potencial a 2500 metros, la humedad específica en el topo del modelo a 2500 m y la humedad relativa a 2m:
  - Wind speed measured in 10 m height (m/s): 1.5
  - Wind direction (deg): 40
  - Roughness length at measurement site: 0.1
  - Initial temperature of atmosphere (°C): 31.89
  - Specific humidity at model top (2500 m, g/kg): 8.91
  - Relativity humidity in 2m: (%): 87

**i)** para el cálculo de la temperatura potencial a 2500m fue necesario calcular la temperatura y la presión a 2500m. Estos valores fueron obtenidos por interpolación;

**ii)** del sitio <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> fueron obtenidos el perfil vertical de la temperatura (°C), presión (hpa) y humedad específica (g/kg) a las 03:00 GMT del 20/07/2017. Los datos de la temperatura, presión y humedad específica son mostrados en la Tabla 16 para la estación de Macapá 82099 SBMQ.

Tabla 16: Perfil vertical da Temperatura (°C) a las 03:00 GMT del 20/07/2017.

c	TEMP(°C)	PRESS(hpa)	MIXR
17	27.4	1012.0	18.98
122	27.0	1000.0	18.17
373	26.1	972.0	15.77
557	25.4	952.0	14.19
810	23.2	925.0	15.29
1472	17.8	857.0	13.24
1543	17.2	850.0	13.03
1665	16.2	838.0	12.96
1726	16.4	832.0	9.55
1788	16.6	826.0	6.95
2017	15.6	804.0	5.37
2198	14.4	787.0	5.41
2317	13.0	776.0	9.18
2492	11.4	760.0	9.58
2536	11.0	756.0	9.69
2851	9.7	728.0	10.06
2967	9.2	718.0	10.20
3178	8.8	700.0	9.57
3614	7.0	664.0	8.30
3689	7.0	658.0	6.29
3815	6.4	648.0	5.89
4137	5.0	623.0	4.95
4269	4.6	613.0	6.71
4349	5.2	607.0	3.26
4842	1.6	571.0	3.26
5203	-1.1	546.0	3.27

Fuente: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

iii) Usando interpolación linear, se obtiene la recta de regresión de la temperatura T(h) en función de la altura (h):

$$T(h) = 0.0048h + 24.422,$$

con coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9777$ . Interpolando la temperatura en  $h = 2500$  metros, tenemos que:

$$T(2500) = 0.0048 \cdot 2500 + 24.422 = 12.422 \text{ °C}$$

Usando interpolación exponencial, se obtiene la relación entre la presión P(h) y la altura h:

$$P(h) = 1020 \cdot e^{-0.0004 \cdot h}$$

con coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9997$ . Interpolando la presión a 2500 m. resulta:

$$P(2500) = 1020 \cdot e^{-0.0004 \cdot 2500} = 794.37 \text{ hpa}$$

Colocando la temperatura y la presión a 2500 metros en la Calculadora Shodor (<http://shodor.org>), obtenemos que la temperatura potencial a 2500 metros es 305.05 °K o equivalentemente de **31.89°C**.

iv) Usando interpolación exponencial, obtenemos a relación entre la humedad especifica H (h) y la altura h:

$$H(h) = 18.861 \cdot e^{-0.0003 \cdot h}$$

Con coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9997$ . Interpolando la presión a 2500 m. resulta:

$$H(2500) = 18.861 \cdot e^{-0.0003 \cdot 2500} \approx \mathbf{8.91 \text{ g/kg}}$$

v) No sitio <http://bancodedados.cptec.inpe.br> del Centro de Previsiones de Tiempo e Clima do Brasil, fueron obtenidos los datos sinópticos del 20 de julio de 2017 03GMT en la

estación del Aeropuerto de Macapá: velocidad del viento a 10 metros, dirección del viento, humedad relativa (%) a 2m.

- En *Model Timing*, se definen los incrementos del tiempo a ser usados. Para evitar problemas de inestabilidad numérica, se utilizó el menor tiempo permitido por el modelo. Esto aumenta el tiempo de procesamiento, resultando en 2 horas de procesamiento por cada hora de simulación, más de otro lado desconsideramos solamente las 3 primeras horas de simulación para que el modelo se equilibre (spinup). Usamos los siguientes valores:
  - Time step  $t_0$  (s): 2
  - Time step  $t_1$  (s): 2
  - Time step  $t_2$  (s): 1
  - Update timing plant process (s): 600
  - Update timing surface data (s): 30
  - Update timing radiation/shadows (s): 600
  - Update timing flow field (s): 900.
  - Se dejó las otras opciones con los valores sugeridos por el ENVI-met y finalmente fue finalizado y grabado el archivo de configuración (*Finish and Save*).

#### 4.1.2.2. Configuración de la altura de las casas y edificios

Para configurar el dominio del modelo a simular, se escogió la imagen generada en el Google Map y fue inserido en *digitalize* del ejecutable SPACES del *ENVI-met*. Esta imagen no tiene importancia para el programa, más sirve para colocar información encima de la imagen, como a altura de los edificios y casas, tipo de suelo y vegetación.

La altura de las casas y edificios puede ser obtenida del Google Earth 3D o de la medición en el propio local. En este trabajo, las alturas fueron obtenidas del Google Earth 3D y conferidas con la visita al local.

Para configurar la altura de las casas, se digitó el valor de la altura para cada casilla de la malla en *Top of buildings or facade element in m* da pestaña *Buildings* (marcada con la línea verde en la Figura 47). Para remover un valor, se tiene que digitar 0 y pasar por encima del valor a remover. La Figura 47, muestra parte de la malla con parte de los valores digitados de la altura de casas y edificios.

Fueron considerados las opciones del ENVI-met con paredes del tipo *Concrete Wall* [C4] (Filled block) y techos con tejas de cerámica de barro (Roof: [R2]) y tejas de concreto (Roofing Tile [R1]).

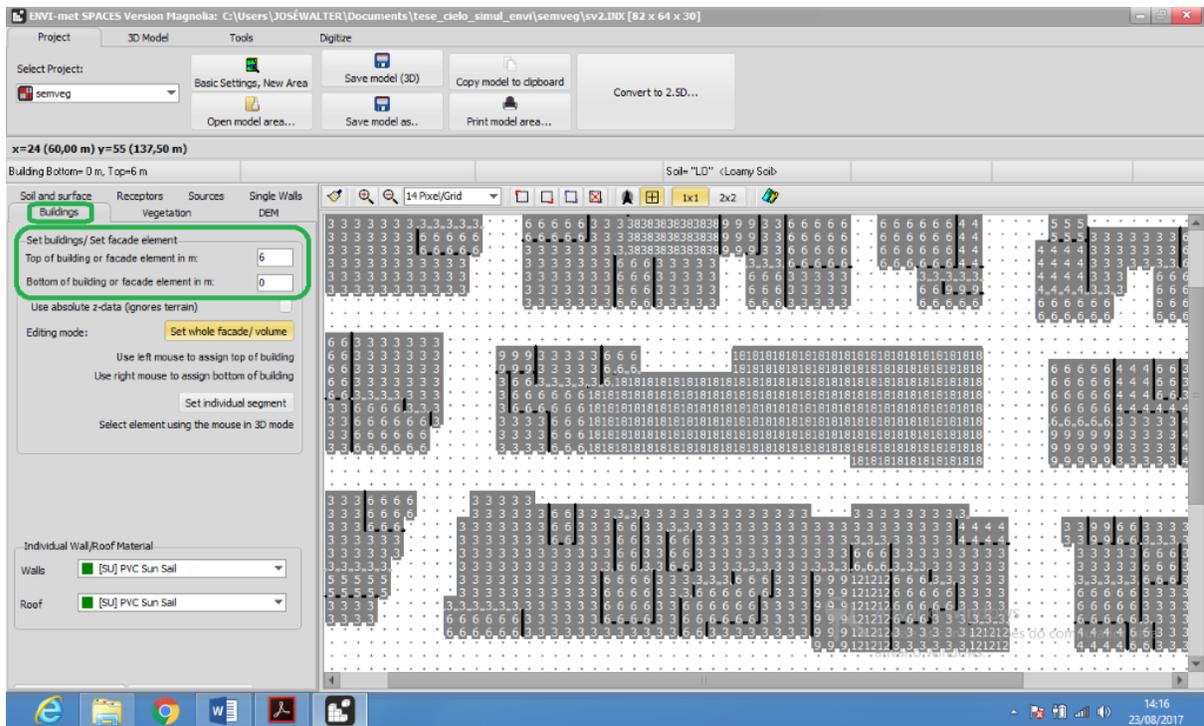


Figura 47: Valores de las alturas de casas y edificios del área del modelo en el ENVI-met.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.3. Configuración del dominio del modelo

En la configuración del modelo necesitamos definir el número de puntos de la malla en un plano horizontal, el número de niveles en la vertical, el incremento dx y dy de la malla y el incremento dz entre las capas verticales.

Para el cálculo de los incrementos dx y dy es necesario el conocimiento de las dimensiones del área horizontal. Para el cálculo del incremento vertical dz es necesario el conocimiento de la altura máxima de los edificios.

El ENVI-met tiene opción para conferir si las configuraciones son compatibles con el modelo (*Inspector Model*), de modo que la simulación no sea afectada por problemas de inestabilidad numérica, haciendo que los resultados sean irrealistas o se tenga la parada de la ejecución por overflow.

Generalmente el análisis del *Inspector Model*, requiere que se aumente el número de niveles verticales o se aumente el borde del modelo con puntos adicionales en todas las direcciones de la malla. Cualquier modificación puede implicar en el aumento de los incrementos dx, dy o dz.

##### **i. Dimensionamiento de la imagen**

A imagen que representa el área simulada tiene las siguientes dimensiones en pixel:

- Longitud: 1024 pixel
- Altura: 768 pixel
- Intensidad de bits: 24

La corrección de la distorsión de la imagen es dada pelo cociente entre la altura y la longitud:

$$\text{Factor de corrección} = \text{altura/longitud} = 768/1024 = 0.75;$$

Como en el “*Basic settings*” del ENVI-met, tenemos que:

$$x\_grids = 60$$

$$y\_grids = 60$$

multiplicamos  $y\_grids$  por el factor de corrección:

$$y\_grid \leftarrow y\_grid \times \text{factor de corrección} = 60 \times 0.75 = 45$$

obtenemos así los valores:

$$x\_grids = 60$$

$$y\_grids = 45$$

Considerando ahora un factor de aumento de 1.2 tenemos los valores a usar en la simulación numérica del ENVI-Met 4:

$$x\_grid = 60 \times 1.2 = 72$$

$$y\_grid = 45 \times 1.2 = 54$$

ii. **Ajuste de los incrementos dx y dy en la malla:**

La imagen obtenida en el Google Earth representa un área de:

$$180 \text{ m} \times 135 \text{ m} = 24.300 \text{ m}^2 \text{ o } 2.43 \text{ hectáreas.}$$

El incremento dx entre dos puntos consecutivos de la malla es dado por la dimensión horizontal del área (180 m) dividido por el número de puntos en dirección horizontal de la malla (72 puntos), en cuanto el incremento dy entre dos puntos consecutivos de la malla es

dado por la dimensión vertical del área (135 m) dividido por el número de puntos en la dirección vertical de la malla (54 puntos):

$$dx = 180/72 = 2.5$$

$$dy = 135/54 = 2.5$$

En la figura 48 se puede observar estos valores en la configuración de la malla.

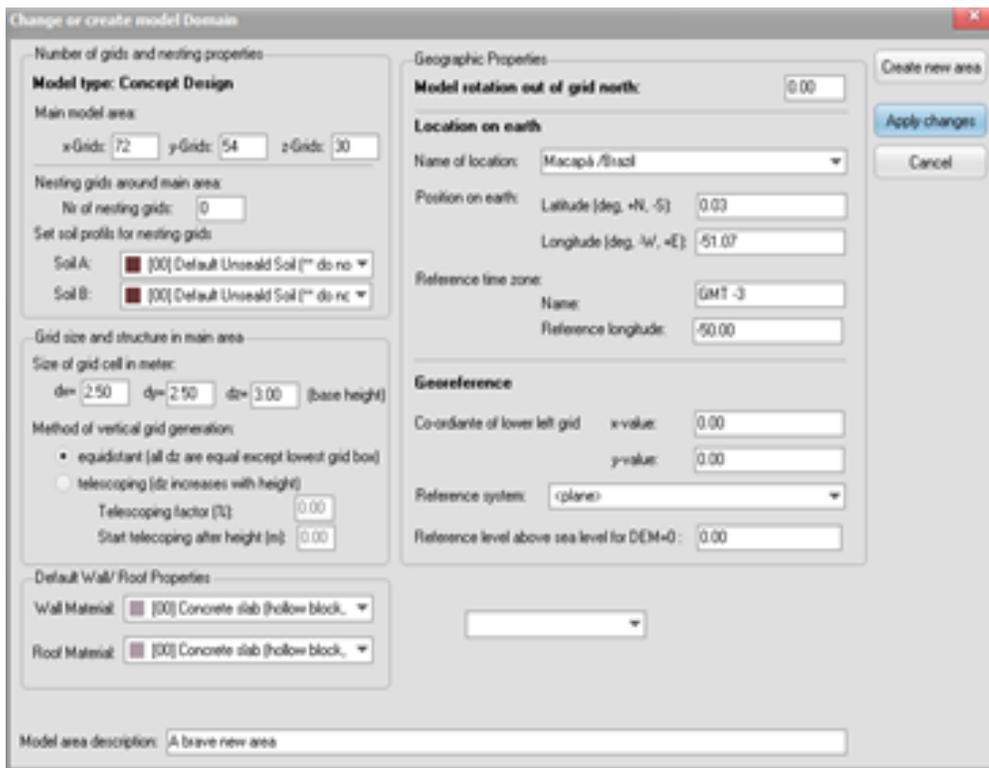


Figura 48: Configuración inicial del dominio del modelo. Fuente: La autora, 2017.

### iii. Ajuste de los niveles en la vertical

La altura máxima de los edificios en nuestra área de simulación es de 38 metros.

Consideramos  $z=30$  niveles en la vertical y incremento  $dz=3$  metros, verificamos que:

$$38 \times 2 \leq 30 \times 3$$

O sea, el doble de la altura máxima de los edificios es menor o igual que el número de niveles considerados multiplicado por el incremento en la vertical. Esta relación entre la altura de los edificios y el número de niveles es una exigencia del ENVI-met (Figura 48).

#### 4.1.2.4. Confirmando el área del modelo

Para conferir si la configuración del área considerada está compatible con el modelo clicamos en *Tools --> Model Inspector*, obteniendo el análisis descrito en la (Figura 49).

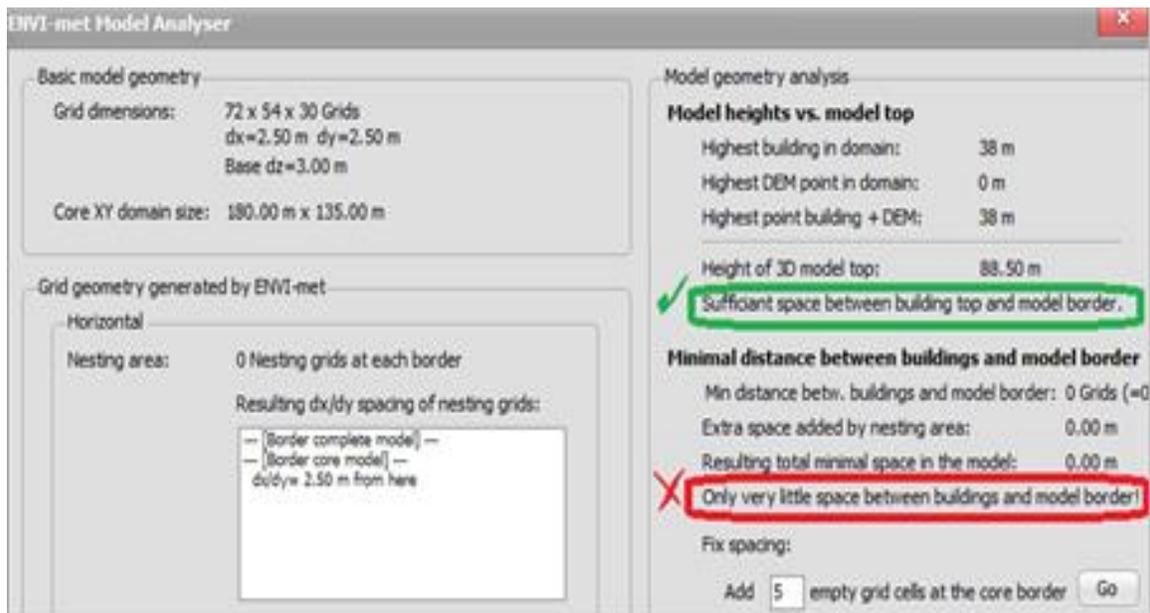


Figura 49: Análisis del modelo con el Model Inspector del ENVI-Met.

Fuente: La autora, 2017.

Se observa en el lado superior derecho (*Model height vs model top*) de la Figura 49, que hay suficiente espacio entre la altura máxima de los edificios y la altura máxima del modelo. (Ver línea verde). De otro lado no hay suficiente espacio entre el borde de la malla y las casas y edificios

(Minimal distance between buildings and model border), pelo cual recomienda aumentar el espacio del borde del modelo (ver línea roja).

Hacemos el ajuste abriendo el archivo de configuración en:

*Project --> Basic Settings, New Area*

y modificando el número de puntos alrededor del borde en el archivo de configuración:

*Nr of Nesting grids 5*

esto es, aumentamos 5 puntos en cada dirección del borde de la malla (encima, abajo, a izquierda y a derecha), obteniendo:

$$X_{\text{grids}} = 72 + 5 + 5 = 82$$

$$Y_{\text{grids}} = 54 + 5 + 5 = 64$$

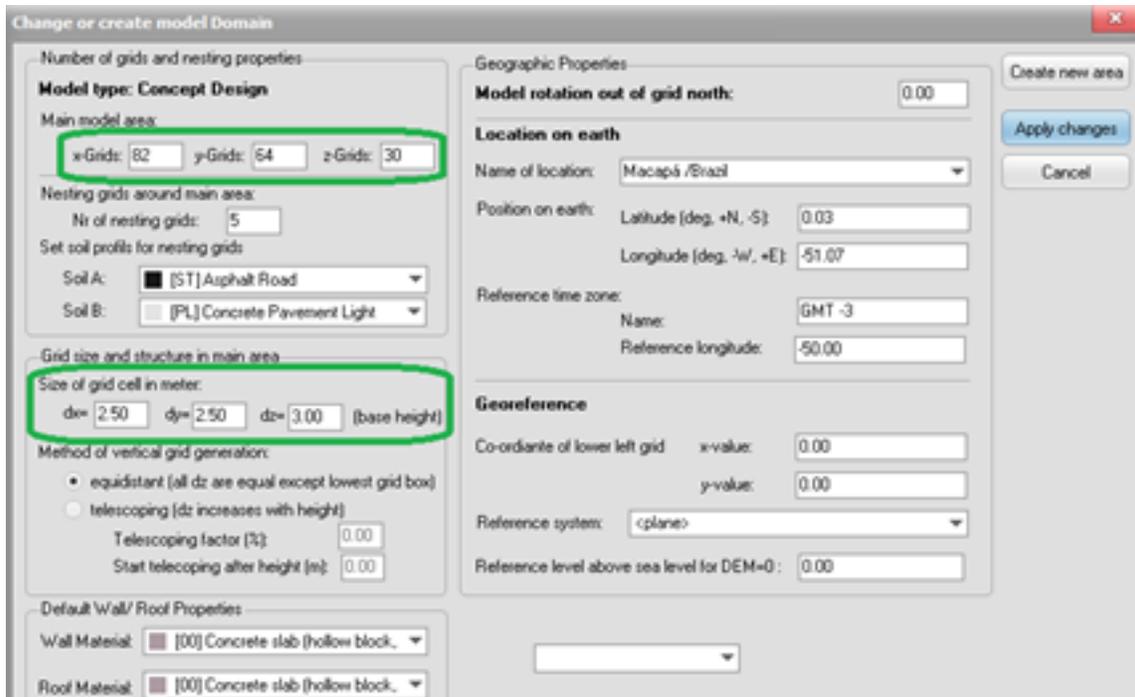


Figura 50: Actualización del número de puntos alrededor de la malla.

Fuente: La autora, 2017.

Se observó todas las configuraciones del modelo detalladas anteriormente, como el número de casillas en la horizontal y vertical, el espaciamiento horizontal y vertical, la ciudad donde está localizado el área de trabajo, la longitud, latitud, el horario en relación al meridiano de Greenwich y la longitud de referencia.

Con *Nr of Nesting grids* igual a 5 (Figura 50) conseguimos que el análisis del modelo sea satisfactorio, como muestra la Figura 51 (ver líneas verdes), adicionando un espacio extra de 5 puntos a cada lado del borde de la malla horizontal.

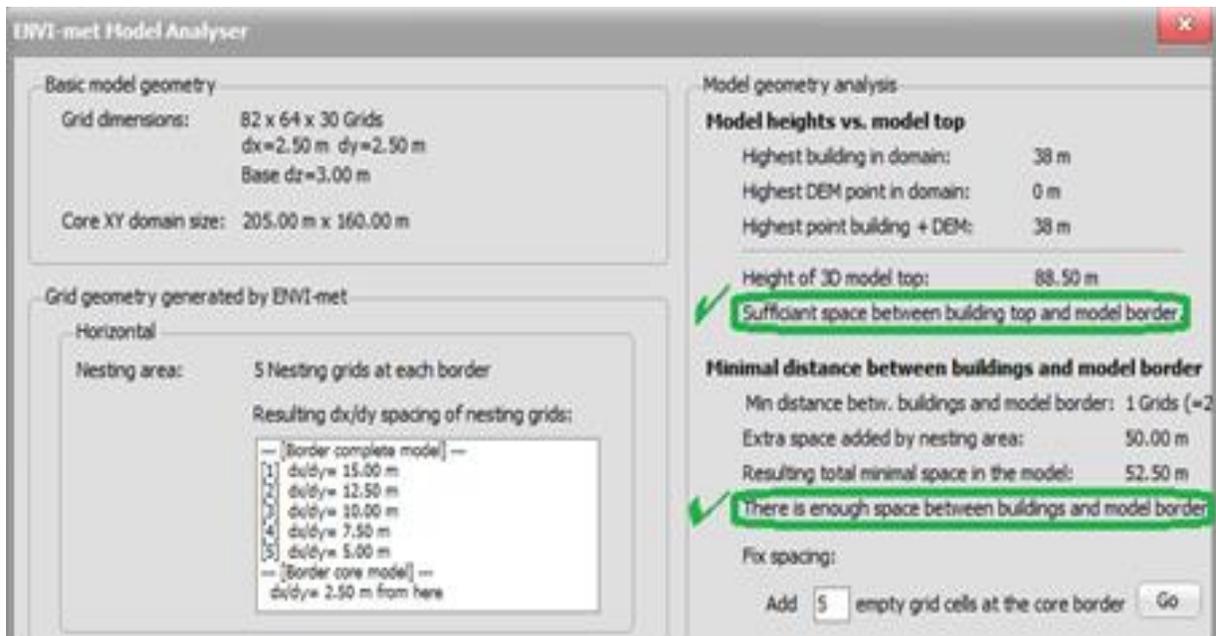


Figura 51: Análisis satisfactorio del modelo con el Model Inspector del ENVI-met.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.5. Configuración del tipo de suelo

El tipo de suelo es configurado en el ENVI-met con la opción *Soil and surface* del ambiente SPACES, como muestra la Figura 52. Aquí se tiene la opción de escoger un tipo de suelo en el ENVI-met o de configurar un tipo de suelos diferente a los predefinidos.

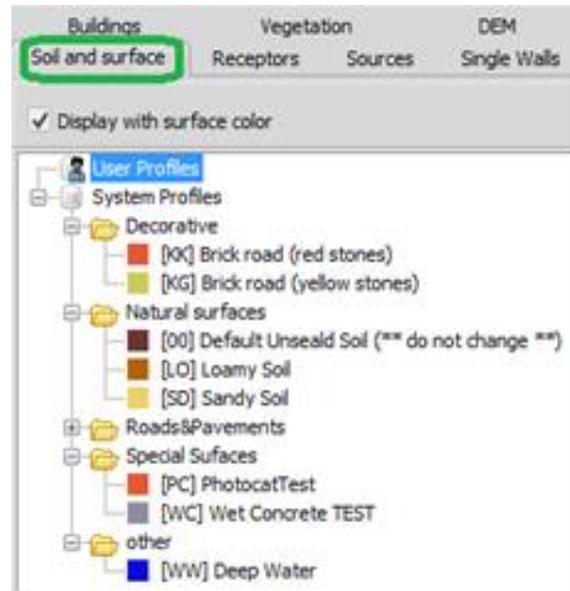


Figura 52: Tipos de suelos en el ambiente SPACES del ENVI-met.

Fuente: La autora, 2017.

Los tipos de suelo predefinidos son clasificados de la siguiente manera:

- Decorativas – Decorative
- Superficies naturales – Natural Surfaces
- Carreteras y pavimentos – Roads & Paviments
- Superficies especiales – Special surfaces
- Otras (superficie liquida) - Others

Para la configuración del suelo, se escogió para las pistas la opción Asphalt Road – [ST] (pistas asfaltadas) y la opción Concrete pavement lights – [PL] (pavimento de hormigón) para los estacionamientos y veredas. Después de llenar cada celda con el tipo de suelo adecuado, el resultado para nuestra área considerada es mostrado en la Figura 53.



Figura 53: Descripción del tipo de suelo en el ENVI-met para el área de estudio.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.6. Configuración del tipo de vegetación

El tipo de vegetación es configurado en el ENVI-met con la opción *Vegetation* del ambiente SPACES, como muestra la Figura 54. Aquí tenemos la opción de escoger un tipo de vegetación predefinido con el ENVI-met o de configurar un tipo de diferentes a los predefinidos. Los tipos de vegetación en el ENVI-met son divididos en dos grupos: Plantas simples (simple plants) y Plantas 3D (3D plants).

Las Plantas simples (a la izquierda en la Figura 54), son divididas en

- Agricultura (Agriculture)
- Césped (Grass)
- Setos y otros (Hedges and others)

Las plantas 3D (a la derecha en la Figura 54), son divididas en:

- Coníferas
- Árboles caducifolios (Deciduos tres), son as árboles que no mantienen las hojas todo el año;

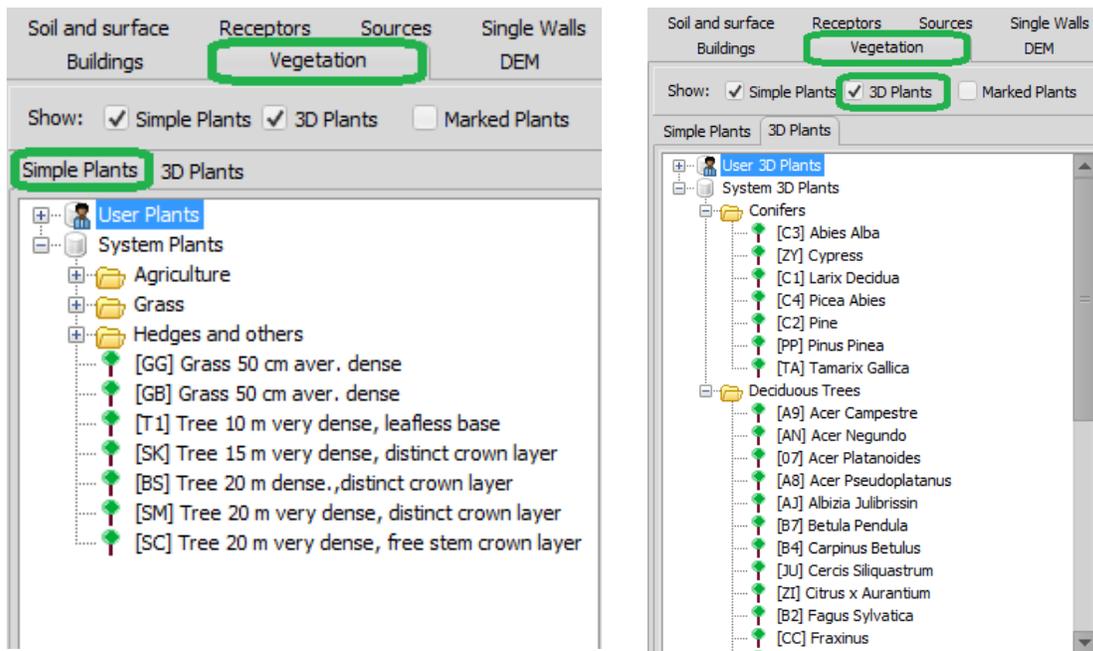


Figura 54: Tipos de vegetación en ambiente SPACES del ENVI-met.

Fuente: La autora, 2017.

En la ciudad de Macapá se observa una predominancia del árbol fructífera de mango (*Mangifera Indica*), el cual no está entre los árboles predefinidas en el ENVI-met. Una de las razones para la predominancia del árbol fructífera de mangos es que no es un árbol caducifolio, pues las hojas son perennes, esto es, mantiene hojas en todas las estaciones del año. Son observados en la ciudad de Macapá algunos tipos de árboles caducifolios que en temporadas del año pierden totalmente las hojas, lo cual disminuye el confort de las personas por no proporcionar ningún tipo de sombra en esos periodos.

Las características del árbol fructífero de mangos son:

- Familia: Anacardiáceas
- Altura media: 8.0 metros
- Altura del tronco: 1.10 metros
- Color del tronco: marrón oscuro
- Rugosidad del tronco: baja
- Diámetro de la copa: 9.0 metros
- Densidad de la copa: alta
- Longitud de la hoja: 30 centímetros
- Ancho de la hoja: 5.5 centímetros
- Color de la hoja: verde oscuro

Para configurar el árbol fructífero de mango en el ENVI-met, usamos el *ambiente Data and Systems* y dentro de este el ambiente *Albero* como muestra la Figura 55.

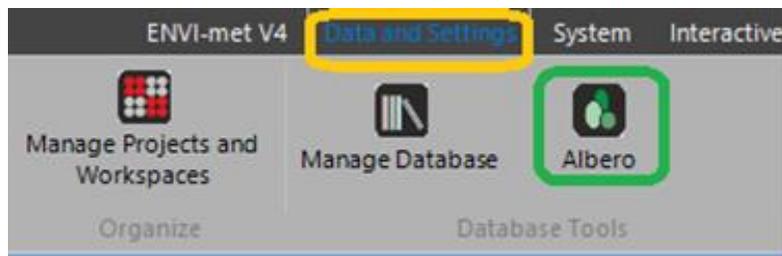


Figura 55: Ambiente Albero para la configuración del árbol fructífera de mangos.

Fuente: La autora, 2017.

En el ambiente Albero, se tiene los planos de proyecciones xy- xz y yz, y dentro de cada plano una malla de puntos. Llenando adecuadamente esta malla de puntos generamos una figura tridimensional, el objetivo es simular un árbol de manga para ser usado en el ENVI-met. La Figura

56, muestra el resultado obtenido con las proyecciones usadas para el árbol. La planta es guardada en el banco de datos del ENVI-met en *User-3D plants* del ENVI-met Albero 1.0 y puede ser usada en las simulaciones numéricas en el computador que fue generada el árbol.

Fueron considerados los siguientes datos adicionales para generar el árbol fructífero de mango:

- Altura: 8 metros
- Ancho de la copa: 9 metros
- Albedo de la hoja: 0.21, dato obtenido de Sousa, 2011
- Profundidad de la raíz: 1.35 metros
- Diámetro de la raíz: 2.40 metros
- Tipo de fijación del CO<sub>2</sub>: C3-Plant

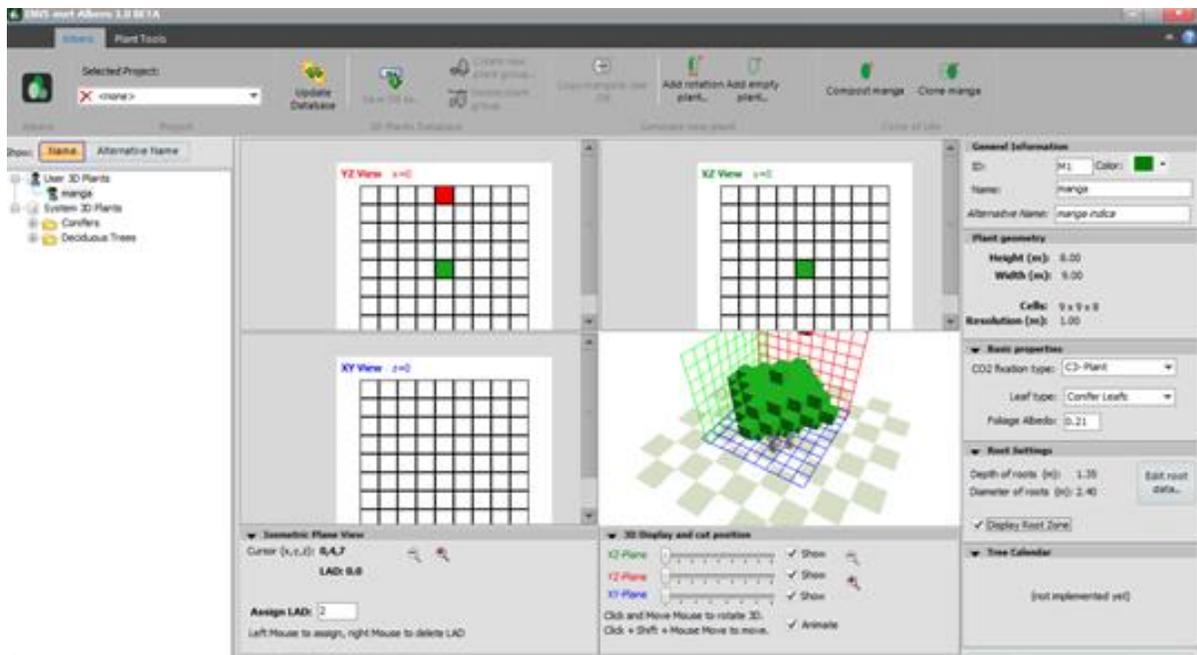


Figura 56: Vista tridimensional en el ambiente Albero del ENVI-Met. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.7. Ejecución del Modelo

Para ejecutar la simulación numérica vamos para la pestaña *ENVI-met*, la cual muestra 3 versiones:

- Versión 100x100x40
- Versión 150x150x35 (Pro Only)
- Versión 250x250x25 (Pro Only)

En este trabajo se utilizó la versión académica gratuita 100x100x40 (100 puntos en la dirección x, 100 puntos en la dirección y 40 niveles verticales en la dirección z). Clicando en esta versión aparece la ventana mostrada en la Figura 57. Siguiendo los siguientes pasos:

- en *Load Simulation* (línea naranja) cargamos el archivo de configuración con extensión. SIM;
- se clicó en *Check Simulation* (línea verde) para que el ENVI-met examine las configuraciones y si no hay alguna incompatibilidad entre los datos y el modelo, al terminar de examinar da un mensaje de que el examen es satisfactorio continuando con el próximo paso, o un mensaje de error, indicando los posibles conflictos a resolver;
- si el *check Simulation* fue satisfactorio, se realiza el- *Run Simulation* para que el ENVI-met ejecute las 30 horas de simulación consideradas en este trabajo. Si en el transcurso de la simulación es muy probable que el incremento de tiempo este muy grande ocasionando overflow, se sugiere disminuir los pasos del tiempo y ejecutar nuevamente el modelo.

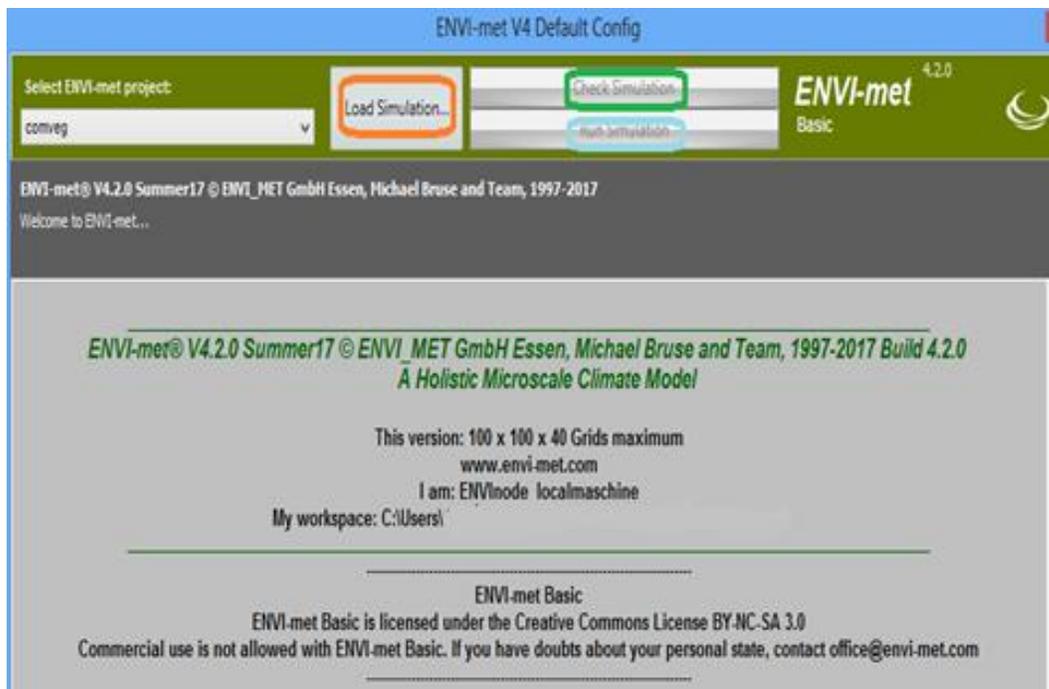


Figura 57: Ejecución de la simulación numérica en el ENVI-met 4.0.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.8. Modelos

En este trabajo queremos analizar la influencia de la arborización en el confort de las personas, en la Avenida Leopoldo Machado de la ciudad de Macapá, ubicada en una región ecuatorial. En la Figura 48, tenemos los siguientes valores para la configuración de la ciudad:

- Model rotation out grid north: 0.00.

No fue observado rotación del norte, la figura que representa el área de simulación está orientada correctamente.

- Name of Location: Macapá
- Latitude (deg +N –S): 0.03

Si la ciudad está en el hemisferio norte el valor es positivo y si está en el hemisferio sur el valor es negativo. En nuestro caso la ciudad de Macapá está en el hemisferio norte con latitud igual a  $0.03^\circ$ , bien próximo de la línea ecuatorial.

- Longitud (-W, +E): -51.07

Si la ciudad está al oeste del meridiano de Greenwich el valor es negativo y si está al este el valor es positivo. En nuestro caso, Macapá está al oeste del meridiano de Greenwich con longitud igual a  $-51.07^\circ$ .

- Reference line zone- Name: GMT -3

El horario de Macapá es 3 horas menos que el horario de Greenwich.

- Reference longitud: -50

Tomamos como referencia a longitud  $-50^\circ$

Para la misma área de simulación se comparó los efectos de la arborización en tres modelos:

- i) Simulación sin arborización (SA): toda el área de simulación sin ningún árbol;
- ii) Simulación con arborización original (AO): aquí se reprodujo los arboles presentes en la imagen real del área de simulación obtenida del Google Earth.
- iii) Simulación con arborización (CA): arborizamos toda a área de simulación, colocando arboles a los dos lados de las pistas y a una distancia de 10 metros entre dos árboles consecutivos.

### **i) Modelo sin arborización (SA)**

En este modelo, el área considerada no tiene árboles. Parece irrealista no colocar ningún árbol, más se observa muchas calles en la ciudad de Macapá sin arborización. En la simulación numérica de este modelo deseamos analizar los índices de confort y de discomfort asociado a una ciudad sin árboles. Además, se analizará el comportamiento de variables meteorológicas como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. También se analizará variables como el CO<sub>2</sub> y su importancia en el medio ambiente. La Figura 58 muestra la visualización 3D del modelo. Los puntos rojos observados son tres Receptores (puntos de observación) para comparar las series de tiempo de los índices de confort y de las variables meteorológicas con otros dos modelos que serán descritos como AO y CA.



Figura 58: Visualización 3D del modelo sin arborización (SA) en el ENVI-met. Fuente:

La autora, 2017.

Los tres receptores denominados R1, R2 y R3 tienen las siguientes características que los diferencian:

- Receptor R1: tiene coordenadas (57,41) en la malla horizontal del modelo y es localizada en un punto de la Avenida Leopoldo Machado, donde no se observa actualmente arborización;
- Receptor R2: tiene coordenadas (59,28) en la malla horizontal del modelo y es localizada en un punto de la avenida Leopoldo Machado, donde se observa actualmente regular arborización;
- Receptor R3: tiene coordenadas (59,11) en la malla horizontal del modelo y es localizada en un punto de la avenida Leopoldo Machado, donde se observa actualmente abundante arborización.

## **ii) Modelo con arborización original (AO)**

En este modelo reproducimos la arborización real del área de simulación considerada, tal como observada en la imagen del Google Earth. La Figura 59 muestra la visualización 3D de este modelo. Se observa que hay diferencias en la arborización de las calles. En la avenida Leopoldo Machado (calle vertical a izquierda en la figura) se observa que la cuadra inferior tiene bastante arborización (aquí está localizado el receptor R3), la cuadra al centro tiene regular arborización (aquí está localizado el receptor R2) y en la cuadra superior se observa en el centro ningún árbol (aquí está localizado el receptor R1). Los resultados de las series pueden ser influenciados por la presencia de las casas y edificios, principalmente en el receptor R1, ubicado junto al Shopping Fortaleza con 18 metros de altura.



Figura 59: Visualización 3D del modelo con arborización original (AO) en el ENVI-met. Fuente: La autora, 2017.

### iii) Modelo con arborización (CA)

En este modelo fue arborizada completamente el área en estudio, es el caso opuesto del modelo sin arborización (SA). Las arboles son localizadas a cada 4 puntos consecutivos, lo que equivale a una distancia de 10 metros entre dos árboles consecutivos. En la Figura 60 se muestra la visualización de este modelo.



Figura 60: Visualización 3D del modelo con arborización total (AO) en el ENVI-met.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.9. Configuración del Índice de Confort PMV

A Norma Internacional ISO 7730/2005 se aplica a la evaluación de ambientes térmicos moderados, desarrollada en paralelo con la norma ASHRAE 55. Esta Norma describe como calcular o índice PMV (voto medio previsto) que mide la sensibilidad humana al frío y al calor. Este índice creado por Fanger (1972) combina parámetros físicos de un ambiente (temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y la humedad del aire), así como os parámetros personales (como actividad física y vestuario).

El índice PMV es medida con la escala séptima de ASHRAE, la cual es simétrica en relación al punto 0, que corresponde al confort térmico y presenta valores positivos de 1 a 3 que corresponden a sensaciones de calor, o negativos de -1 a -3, que corresponde a sensaciones de frío. En el BioMet, la escala usualmente varia de -4 (muy frío) a +4 (mucho calor), mas como el

valor PMV es una función matemática del clima local, en varias aplicaciones puede alcanzar valores debajo de -4 o encima de +4.

La función matemática que define el valor PMV es dado por:

$$PMV = [0.028+0.303 \exp (-0.036 \times M/A_{Du})] [H/A_{Du}-E_d-E_{sw}-E_{re}-L-R-C]$$

Los datos de entrada de las variables meteorológicas son:

- temperatura del aire:  $T_a$
- temperatura media radiante:  $T_{mrt}$
- presión del vapor:  $e$
- velocidad local del viento:  $u$

Los datos de entrada de la configuración del cuerpo humano son:

- insolación debido al vestuario:  $I_{cl}$
- producción de energía mecánica del cuerpo:  $M$
- factor del trabajo mecánico:  $\eta$  (0 en la mayoría de los casos)

En el BioMet, el cálculo del PMV y PPD, se toma siempre como referencia el siguiente dato: hombres de 35 años, con altura de 1.75 metros y peso de 75 kilos. Estos valores no pueden ser modificados en los cálculos del PMV/PPD.

Las componentes de la ecuación del cálculo del PMV, son descritos en detalle:

- $0.028+0.303\dots$ : coeficientes empíricos de adaptación para transferir el balance energético del cuerpo al rango de escala PMV;

- $M/A_{Du}$ : producción de energía mecánica del cuerpo. La producción de energía mecánica depende de la actividad de las personas;
- $\frac{H}{A_{Du}} = \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta)$ : energía restante interna. Energía producida no usada para el trabajo mecánico, siendo  $A_{Du}$  el área de Dubois (superficie de la piel);
- $E_d = 0.305 \cdot \left( 57.3 - 0.07 \cdot \frac{H}{A_{Du}} - e \right)$ : cantidad de vapor que se difunde a través de la piel;
- $E_{sw} = 0.42 \cdot \left( \frac{H}{A_{Du}} - 58 \right)$ : evaporación del sudor en la piel;
- $E_{re} = 0.0017 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (58.7 - e)$ : calor latente perdido a través de la respiración;
- $L = 0.0014 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - T_a)$ : intercambio de calor sensible a través de la respiración;
- $R = 3.95 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4)$ : balance energético radiactivo del cuerpo (vestimenta)
- $f_{cl} = 1 + I_{cl} \cdot 0.15$ : factor de ampliación del área corporal debido a la ropa;
- $T_{cl}$ : temperatura superficial de la ropa;
- $C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_i)$ : intercambio energético por convección;
- $h_c = \max(2.05 \cdot (t_{cl} - t_a), 12.1\sqrt{W})$ : transferencia de calor turbulento entre la ropa y el aire;
- $W = \max(u(x, y, z), v_p)$ : velocidad relativa del viento en la superficie del cuerpo. En BioMet se asume que para condiciones al aire libre  $v_p$  es la velocidad que camina una persona.

En el modelo PMV, la temperatura de la ropa es el único parámetro del balance de energía que interactúa con el ambiente. Luego, la temperatura de la piel depende únicamente del nivel de actividad de la persona.

- $t_{sk} = 35.7 - 0.0275 \cdot \frac{H}{A_{Du}}$ : temperatura media de la piel;

- $t_{cl} = t_s - 0.155 \cdot I_{cl} \cdot (R+C)$ : la temperatura de la ropa se calcula en base a la temperatura de la piel y los flujos de energía convectiva y radiactiva en la superficie de la ropa.

Para calcular el valor PMV en el BioMet es necesario alimentar el software con información de variables meteorológicas y los parámetros personales.

Para las variables meteorológicas, ir en el BioMet a “*Select Data folder*” para seleccionar el directorio donde están los resultados de las simulaciones numéricas del ENVI-met y escoger la carpeta “atmosphere”. Se mantuvo las variables meteorológicas:

- Air temperatura  $T_a$
- Mean radian temperatura TMRT
- Horizontal wind speed  $uv$
- Specific humidity  $q$

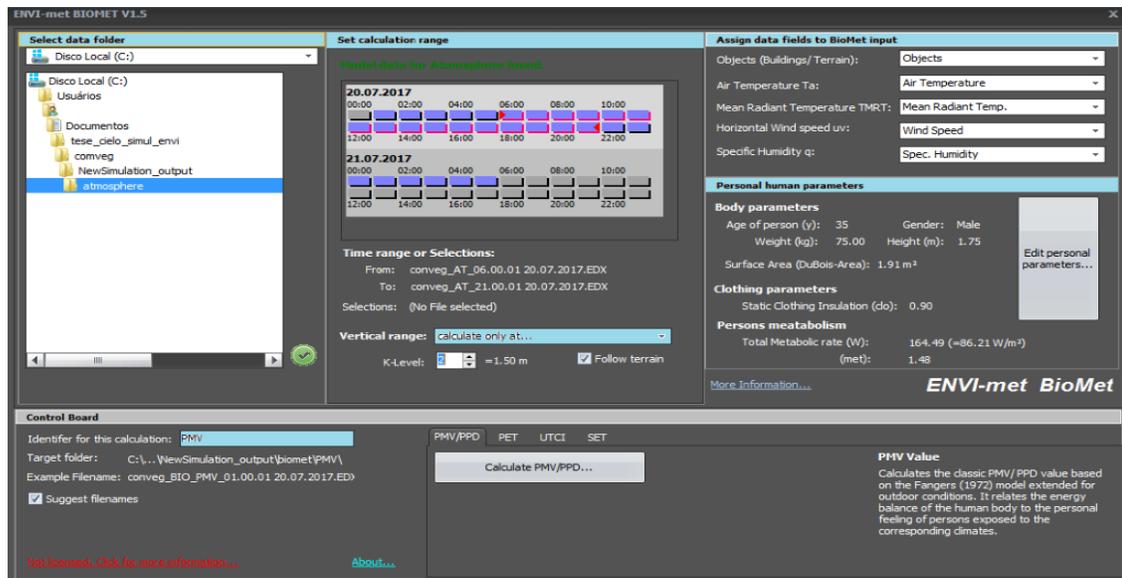


Figura 61: Configuración de la carpeta con los datos meteorológicos, período temporal y nivel vertical para el cálculo del PMV. Fuente: La autora, 2017.

En “set calculations range” se eligió el período de tiempo para analizar o PMV, de las 06:00 a las 21:00 del día 20/07/2017 y definiendo el nivel vertical en “vertical range”, que en este caso fue definido en el nivel k=2, que equivale a 1,50 metros (ver Figura 61).

Fue definido también los parámetros personales de las personas en “*Personal human parameters*”, clicando en “*Edit personal parameters*”. Los parámetros que no pueden ser cambiados en el ENVI- met son:

- Age of person (y): 35 (edad de la persona es 35 años)
- Gender: Male (sexo masculino)
- Weight (kg): 75 (75 kg de peso)
- Height (m): 1,75 (1,75 metros)

Para el parámetro “*Clothing parameters*” (parámetros de la ropa), se consideró la vestimenta común de una persona para trabajar, los valores dados en unidad de clo (stating clothing insulation), según la Norma *ISO 7730*, son descritos en la Tabla 17.

Tabla 17: Valores de resistencia térmica ofrecida por la ropa

Vestimenta	Clothing parameters (clo)
camisa leve con mangas cortas	0,14
pantalón leve	0,26
Zapatos	0,04
Calzoncillo	0,05
Medias finas	0,03
Total	0,52

Para el “Set personal human parameters” (parámetros de la persona), fue considerado la Norma *ISO 7730, 2005*:

- Basal rate (W): **84.49** (este valor no puede ser modificado);

- Work metabolism (W): **110**, el cual corresponde a una persona caminando dos kilómetros;
- Calculate from walkind speed (m/s): **1.9**, lo que corresponde a una persona caminando a la velocidad de 1.9 m/s.
- Sum metabolic work (W): **194.49**, este valor es la suma de Basal rate y Work matabolismo.

Los parámetros de la persona pueden ser visualizados en la Figura 62.

Figura 62: Parámetros personales del cuerpo, ropa y metabolismo en el BioMet. Fuente: La autora, 2017.

Una vez definidos todos los parámetros solicitados por el ENVI-met, se clicó en “Calculate PMV/PPD...” para obtener los valores de los índices PMV y PPD.

Para obtener las tablas y gráficos se utilizó el aplicativo LEONARDO del ENVI-met, para lo cual se siguió los siguientes pasos (ver Figura 63):

- en *DataNavigator*, se clicó en File Set A y se identificó la carpeta con los resultados de la simulación del ENVI-met, dentro esta la pasta *biomet* y luego la pasta *PMV*. Dentro de esta carpeta se clicó en el archivo con el horario de interés, por ejemplo: *output\_BIO\_PMV\_12:00:01 20.07.2017.EDX*;

- en *DataNavigator* se clicó en *2D Map* y en *Data* que está en la hoja *Assign Map Layers and Elements*, se eligió el índice PVM o PPD, según lo deseado a calcular;
- en *DataNavigator*, vamos para la hoja *Define Type and Position and View Plane* y luego a *Position View Plane* y se definió  $k=2$  que equivale a 1.50 metros de altura. Aquí el usuario puede definir el nivel que desea calcular el PMV o PPD;
- en *DataNavigator*, vamos para la hoja *Generate 2D Map* y se clicó en *Extract 2D* siendo generado el gráfico de los valores PMV o PPD.

Tenemos la opción de elegir simultáneamente un segundo archivo *File Set B*, hacer el gráfico y aun comparar las diferencias entre estos dos archivos en *Compare 2D*. También se puede elegir un punto del gráfico y generar una serie de tiempo de las variables a disposición del usuario.

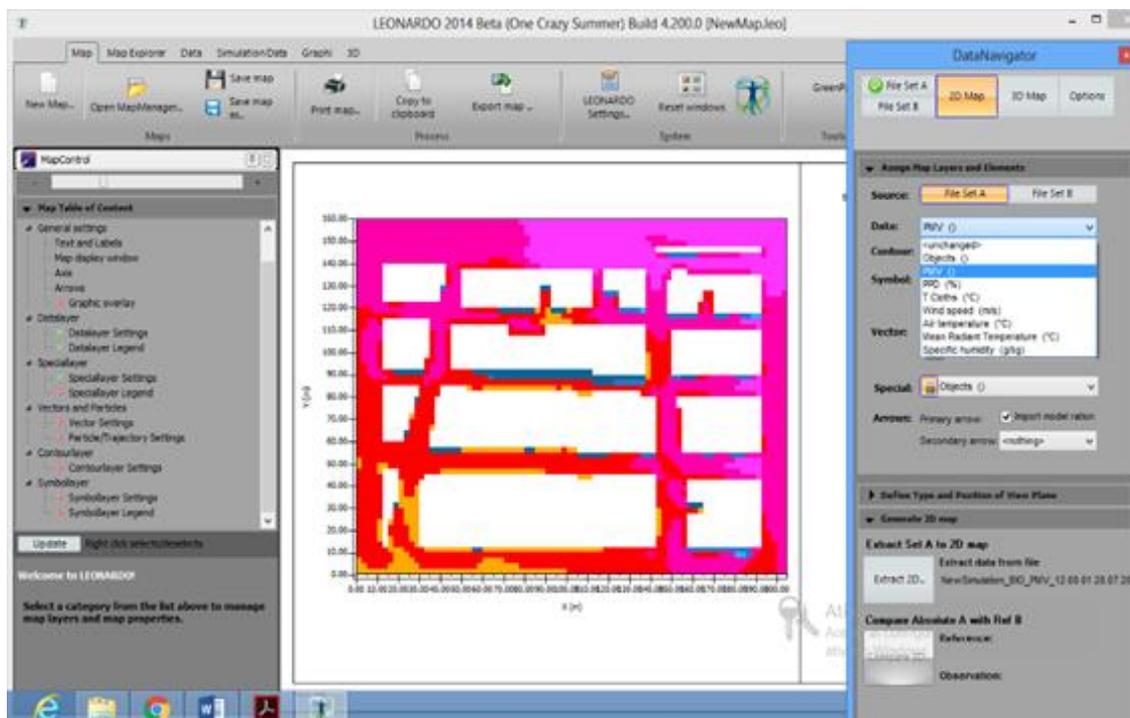


Figura 63: Herramienta Leonardo para imprimir gráficos y tablas de las simulaciones numéricas del ENVI-met. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.10. Configuración del Índice de Discomfort PPD

La norma Internacional ISO 7730/2005 también describe como calcular el índice de personas insatisfechas con o ambiente (PPD), que es a porcentaje de personas que gustarían que el ambiente estuviese más caliente o más frío. Este índice es basado en el porcentaje de un grande número de personas votando entre -4 a +4 conforme quiera el ambiente más frío o más caliente. Los valores PPD son calculados a partir de los valores PMV, según la siguiente ecuación:

$$PPD=100-95 \cdot e^{-[0.03353 \cdot PMV^4+0.2179 \cdot PMV^2]}$$

La Figura 64, representa la representación gráfica de la ecuación anterior. El valor mínimo observado en esta figura corresponde a 5%, que es el valor más bajo de personas insatisfechas, ya que no es posible proporcionar simultáneamente un ambiente térmico óptimo para cada persona. El valor máximo de 100% é alcanzado para valores PMV menores que -4 y mayores que +4.

Los valores del PPD en el ENVI-met, son obtenidos cuando se calcula los valores del PMV y para obtener las tablas y gráficos se usa la herramienta LEONARDO.

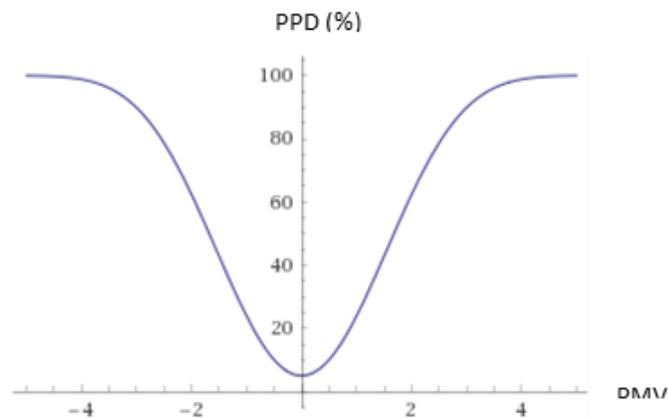


Figura 64: Porcentaje de personas insatisfechas con el ambiente térmico (PPD) en función del voto medio estimado (PMV). Fuente: ISO 7730.

#### 4.1.2.11. Resultados del Índice de Confort Térmico –PMV

Son descritos los resultados de las simulaciones numéricas para el índice de confort térmico PMV, tanto en cada uno de los receptores como en cada uno de los modelos simulados en el ENVI-met. Los valores numéricos de las series temporales son presentados en el APÉNDICE B.

Primero se analizó la serie de tiempo de los 3 receptores entre la 03:00 horas del día 20/07/2017 y las 05:00 horas del día 21/07/2017, para cada uno de los tres modelos simulados en el ENVI-met.

El modelo SA corresponde a la región total sin ningún árbol, el modelo AO corresponde a la región con las arboles originales como obtenidas por el Google Earth, en cuanto el modelo CA corresponde a la arborización completa de toda la región considerada.

Considerando la arborización original (modelo AO), el receptor R1 fue localizado en un área con poca arborización, el receptor R2 en un área con arborización media y el receptor R3 con mayor arborización.

Debido a factores adicionales a la arborización, como a la sombra de los edificios y la dirección de los vientos que pueden influenciar el valor del índice del confort térmico, se analizó la serie temporal de los receptores en cada uno de los modelos simulados.

##### **i) Series temporales del índice PMV en los receptores para el modelo SA.**

En la Figura 65, se tiene la serie temporal de los receptores R1, R2 y R3 en la simulación del modelo SA. En este modelo no tenemos ningún árbol, por lo cual las diferencias observadas en las series temporales son debidas a otros factores.

- Las series temporales son muy similares, excepto a las 07:00 y a las 16:00 horas del día 20/07/2017. A las 7:00 horas los valores del índice de confort PMV son 1.27, 0.50 y 1.1814, en cuanto a las 16:00 horas los valores son 4.3399, 6.6088 y 6.4974 para los receptores R1, R2 y R3 respectivamente.
- En el período de las 07:00 a 15:00 horas del 20/07/2017 los valores del PMV son ligeramente menores para el receptor R3, ver Tabla B1 (APÉNDICE B).
- Los valores del índice PMV, que son mayores que +3 en la escala de ASHRAE, ocurren en el período de las 08:00 a las 17:00 donde la incidencia de los rayos solares es más intensa, estos valores llegan próximos de +7 a las 15:00 horas.

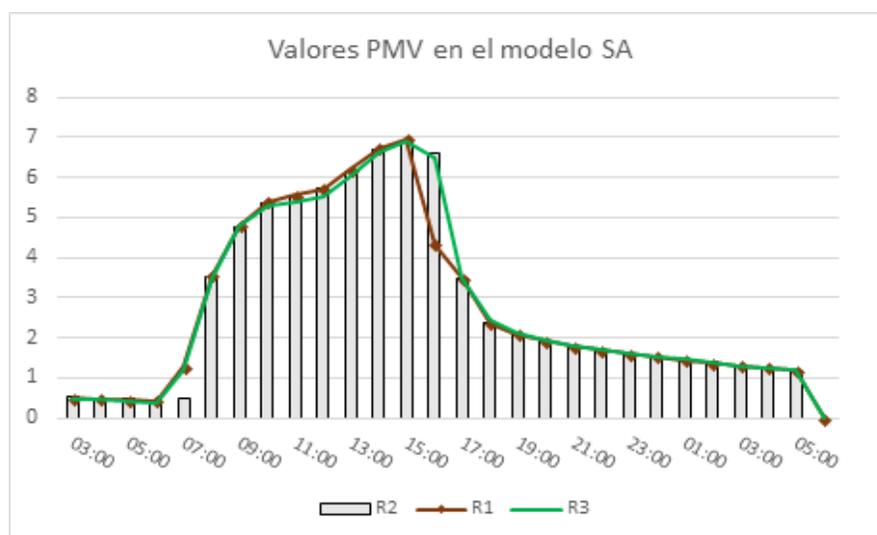


Figura 65: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo SA. Fuente: La autora, 2017.

## ii) Series temporales del índice PMV en los receptores para el modelo AO

En la Figura 66, se obtiene la serie temporal de los receptores R1, R2 y R3 en la simulación del modelo AO. En este modelo se colocó los árboles que están presentes en la región de la simulación numérica, según la imagen real obtenida en el Google Earth.

- Las series temporales del índice de confort son muy similares en los horarios iniciales y finales de la simulación, ver Tabla B2 (APÉNDICE B).
- El receptor R2 presenta un menor índice en los horarios de las 11:00 a las 15:00 horas del día 20/07/2017, fuera de este período el receptor 3 é menor que el receptor 2.
- El receptor R1 presenta los mayores valores del PMV entre las 08:00 a las 16:00 horas del 20/07/2015.
- Se podría esperar que el índice de confort en el receptor R3 fuese menor que en el receptor 2 en el período de mayor intensidad de luz solar, entretanto la posición de los receptores y la configuración de las casas y edificios influyen estos valores.

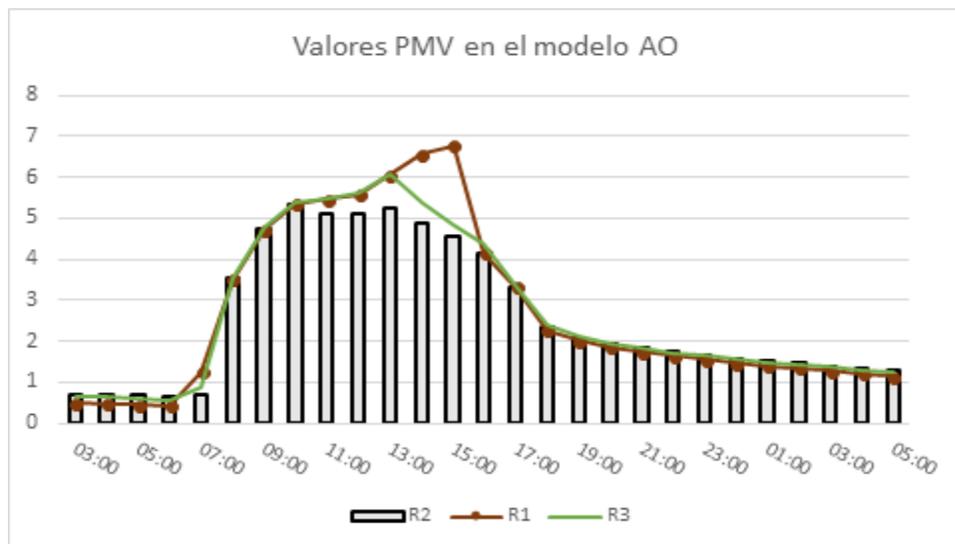


Figura 66: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo AO. Fuente: La autora, 2017.

### iii) Series temporales del índice PMV en los receptores para el modelo CA

En la Figura 67, se tiene la serie temporal de los receptores R1, R2 y R3 en la simulación del modelo CA. En este modelo las calles en la región de simulación fueron totalmente arborizadas, siendo que el espacio entre dos árboles fue de 10 metros.

- La serie de tiempo de los valores del índice PMV para el receptor R3 son ligeramente menores que los del receptor R2. Comportamiento diferente es observado en los valores PMV en el receptor R1, con valores menores entre las 09:00 a las 11:00 horas y valores mayores entre las 12 y las 15:00 horas del día 20/07/2017, ver Tabla B3 (APÉNDICE B).
- Los mayores valores del índice PMV son observados en el modelo sin arborización SA y en relación a los receptores los mayores valores son generalmente observados en el receptor R1.

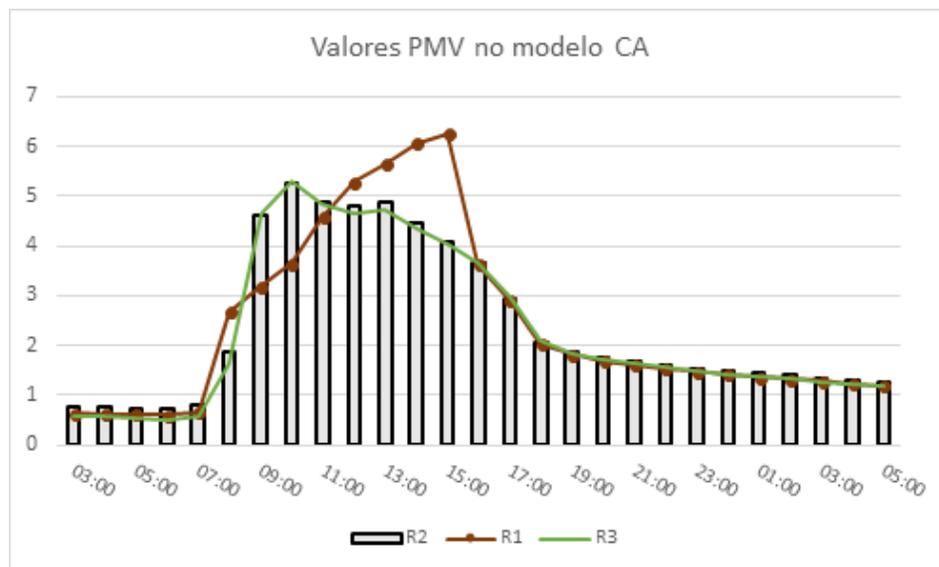


Figura 67: Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo CA. Fuente: La autora, 2017.

Analizaremos a seguir las series temporales del índice PMV en cada receptor, para determinar si la arborización de las calles influencia en el confort térmico de las personas.

#### **iv) Series temporales del índice PMV de los modelos en el receptor R1**

El receptor R1 localizado en un punto con coordenadas  $x=57$  y  $y=41$ , donde no son observados árboles en el modelo AO. La tabla B4 (APÉNDICE B) y la Figura 68 muestran la serie temporal del índice de confort PMV para los tres modelos (SA, AO y CA).

- todos los valores del PMV son positivos, así la sensación de frío no es observada, característico de una zona ecuatorial. Los menores valores son observados en los primeros horarios (06:00 y 07:00 horas) y en los últimos horarios (19:00 a 21:00 horas) en los cuales no hay incidencia de luz solar;
- los valores PMV del modelo CA son menores que en los otros modelos, principalmente en el período de incidencia solar, a partir de las 06:00 horas;
- los valores PMV del modelo VO y SV son muy similares (ligeramente mayor en el modelo SV), lo cual indica que el ENVI-met está simulando correctamente la ausencia de arborización;
- entre las 03:00 y las 06:00 horas del día 20/07/2017 los valores PMV en el receptor R1 son ligeramente menores, debido a que parte del calor disipado en el período nocturno es retenido por los árboles.

Así se observó la clara influencia positiva de la vegetación en el confort humano, los valores del PMV llegan a disminuir dos puntos entre las 09:00 y 10:00 horas de la mañana en el modelo CA.

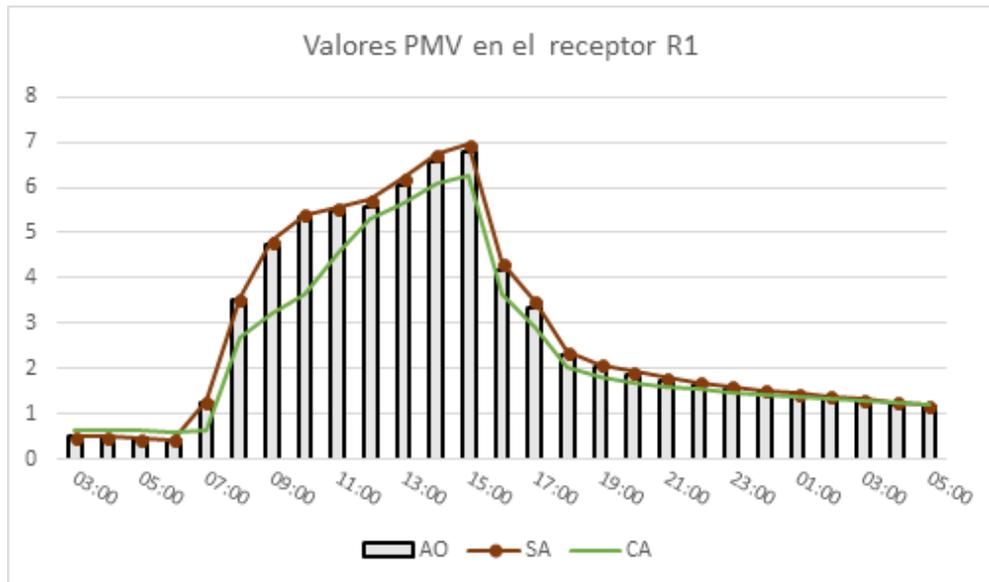


Figura 68: Índice de confort PMV en el receptor R1 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA). Fuente: La autora, 2017.

#### v) Series temporales del índice PMV de los modelos en el receptor R2

El receptor R2 localizado en un punto con coordenadas x=59 y y=28, donde son observados una regular cantidad de árboles en el modelo AO. La Tabla B5 (APÉNDICE B) y la (Figura 69), muestran la serie temporal del índice de confort PMV para los tres modelos (SA, AO y CA).

- Los valores del PMV de los modelos AO y CA son ahora muy similares, indicando que el ENVI-met reconoce que en ambos modelos hay árboles. Entretanto, en las

horas de mayor incidencia solar es observado que los valores PMV son menores que los otros dos modelos, producto de tener mayor arborización.

- Los mayores valores son observados en el modelo sin árboles SV, llegando a tener hasta casi +3 puntos mayores entre las 15:00 y 16:00 con relación al modelo CA.
- Nuevamente es observado que en el período nocturno los valores PMV son ligeramente menores que los otros dos modelos, debido a que las arboles retienen el calor disipado en esos horarios.

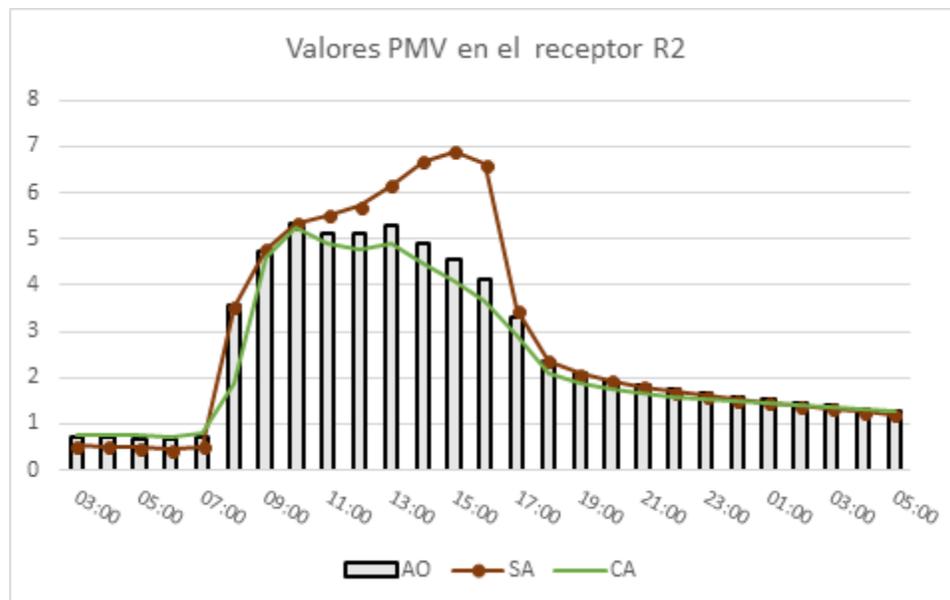


Figura 69: Índice de confort PMV en el receptor R2 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA). Fuente:

La autora, 2017.

### Vi) Series temporales del índice PMV de los modelos en el receptor R3

El receptor R3 localizado en un punto con coordenadas  $x=59$  y  $y=11$ , donde son observados una mayor cantidad de árboles en el modelo AO. La Tabla B6 (APÉNDICE B) y la Figura 70, muestran la serie temporal del índice de confort PMV para los tres modelos (SA, AO y CA).

- Los valores del modelo CA son nuevamente menores en casi toda la serie temporal, principalmente en los horarios de mayor incidencia solar. Mismo teniendo bastantes árboles alrededor del receptor R3, el modelo AO presenta valores PMV mayores que el modelo CV, más menores que el modelo sin arborización R1. Nuevamente los valores PMV del modelo sin árboles R1 son hasta +3 puntos mayores en el periodo de incidencia solar.
- Las series temporales de los valores PMV de los modelos en los receptores muestran claramente la influencia positiva de la arborización en el confort de las personas.

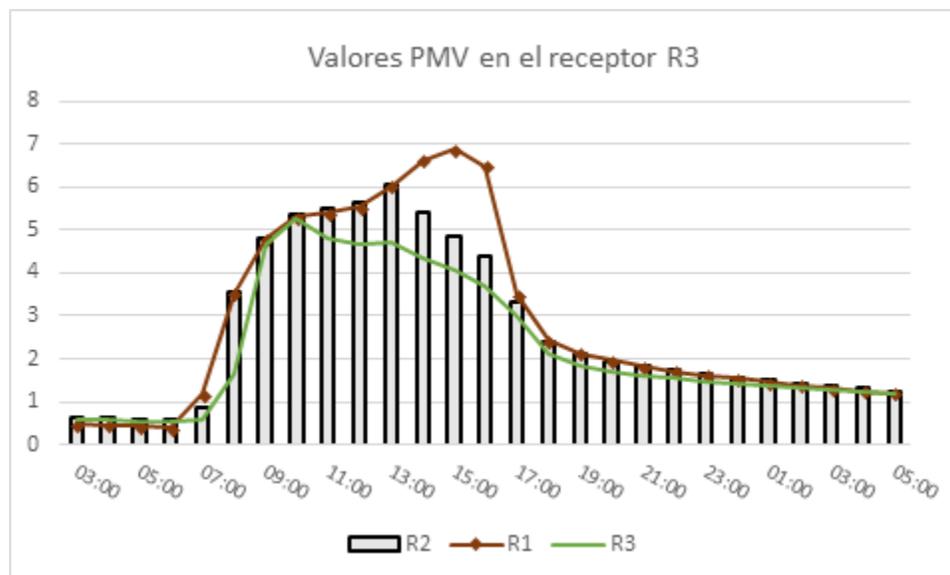


Figura 70: Índice de confort PMV en el receptor R3 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA). Fuente:

La autora, 2017.

Las series temporales de los valores PMV de los modelos en los receptores muestran claramente la influencia positiva de la arborización en el confort de las personas. Se analizó los

valores PMV en toda el área considerada para dos horarios con mayor incidencia de luz solar: 12:00 y 15:00 horas del 20/07/2017.

**vii) Índice de confort PMV a las 12:00 horas del día 20/07/2017**

- En la Figura 71, tenemos los valores PMV para el modelo sin arborización SA, estos valores varían entre un mínimo de 4.05 y un máximo de 6.03. Los valores mínimos son observados próximos a las paredes de los edificios y casas de mayor altura y los mayores valores son observados no medio de las pistas. A mayoría de los valores están entre 5.44 y 5.83, definiendo una sensación térmica muy alta, encima de los padrones recomendados para confort térmico.

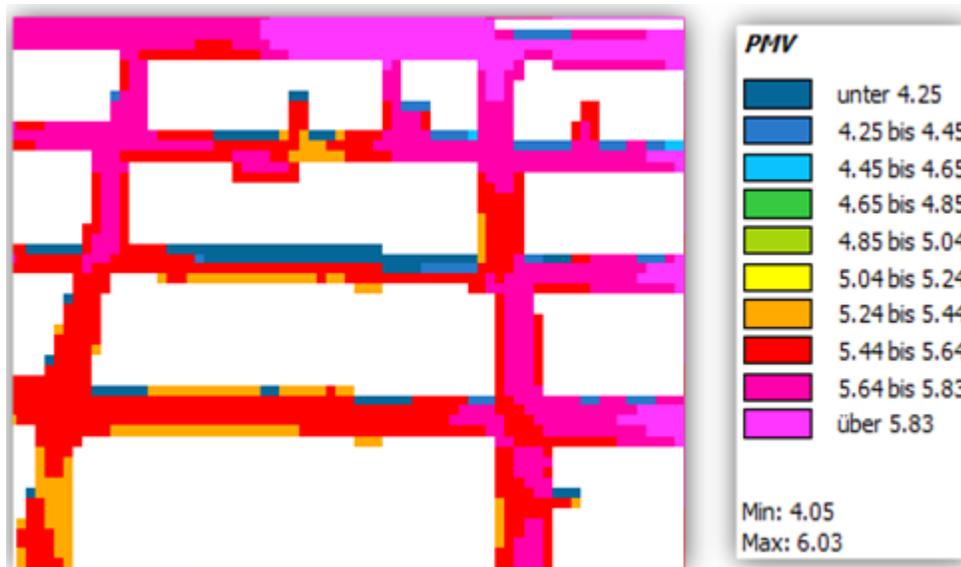


Figura 71: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo SA.

Fuente: La autora, 2017.

- En la Figura 72, tenemos los valores PMV para el modelo con la arborización original AO, estos valores varían entre un mínimo de 3.84 y un máximo de 5.96, valores menores que los valores PMV del modelo sin arborización SA. Los valores mínimos son ahora observados donde hay árboles, en cuanto próximo de los edificios sin árboles los valores son similares a los del modelo SA. Nuevamente los mayores valores PMV son observados en el centro de la pista.

Las simulaciones del ENVI-met detectan donde hay árboles y disminuye el valor PMV principalmente por causa de la sombra ofrecida por estos árboles.

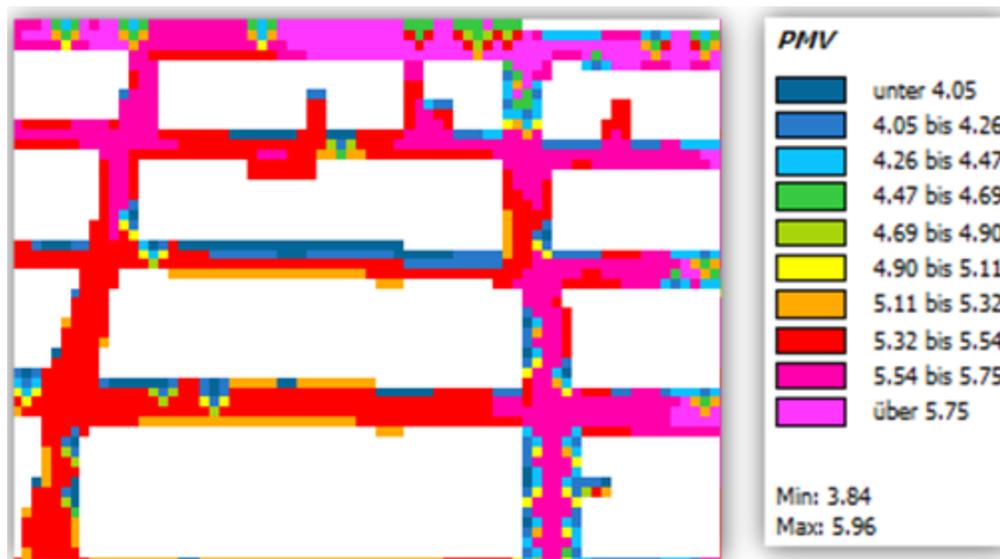


Figura 72: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo AO. Fuente: La autora, 2017.

- En la Figura 73, tenemos los valores PMV para el modelo con arborización CA, estos valores disminuyen aún más con relación a los modelos SA y AO, con un mínimo de 3.37 y un máximo de 5.74.

Se observa ahora que en todo lugar donde hay árboles los valores PMV son bastantes menores, mejorando o confort de las personas. Donde las calles son estrechas, los árboles de los dos lados de la calle cubren casi enteramente la pista, produciendo valores PMV menores. Ya donde las calles son más amplias, los árboles no llegan a cubrir el centro de la pista y es allí donde se presentan los mayores valores del PMV, más aún menores que los otros dos modelos.



Figura 73: Índice de confort medido a las 12:00 horas en el modelo CA. Fuente: La autora, 2017.

- En la Figura 74, están las diferencias entre los valores PMV del modelo sin arborización SA y con arborización original AO, valores positivos indican que estos son mayores en el modelo sin vegetación SA. Todos los valores son positivos, hasta un máximo de 1.66, o sea los valores PMV son hasta 1.66 unidades mayores en el modelo AS. Estos mayores valores ocurren precisamente donde están localizadas

los árboles del modelo AO, donde no hay árboles no son observadas diferencias significativas entre los dos modelos.

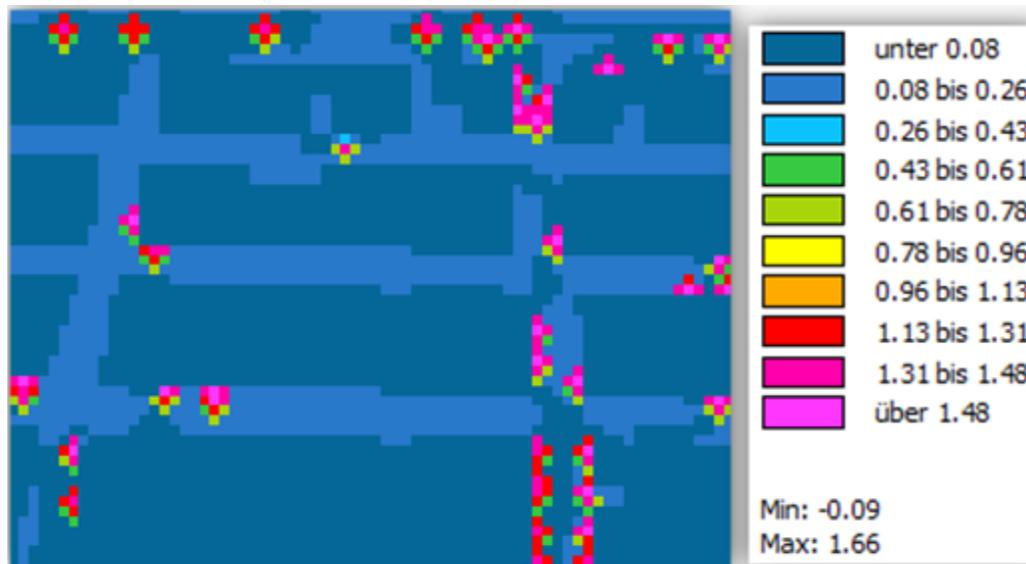


Figura 74: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos SA y AO. Fuente: La autora, 2017.

- En la Figura 75, están las diferencias entre los valores PMV del modelo sin arborización SA y con arborización original AO, valores positivos indican que estos son mayores en el modelo SA. Todos los valores son positivos, observándose un aumento en el valor máximo para 2.11. Las mayores diferencias son observadas alrededor de los árboles, cubriendo ahora toda la región de la simulación numérica. Cuando las calles son estrechas las diferencias de los valores en el centro de la pista son altos, indicando una mejora en el confort de las personas. Cuando las calles son amplias, los valores PMV en el centro de la pista son bajos, más mayores que la comparación entre los modelos SA y AO. Los efectos de la arborización son notoriamente positivos para el confort térmico de las personas.

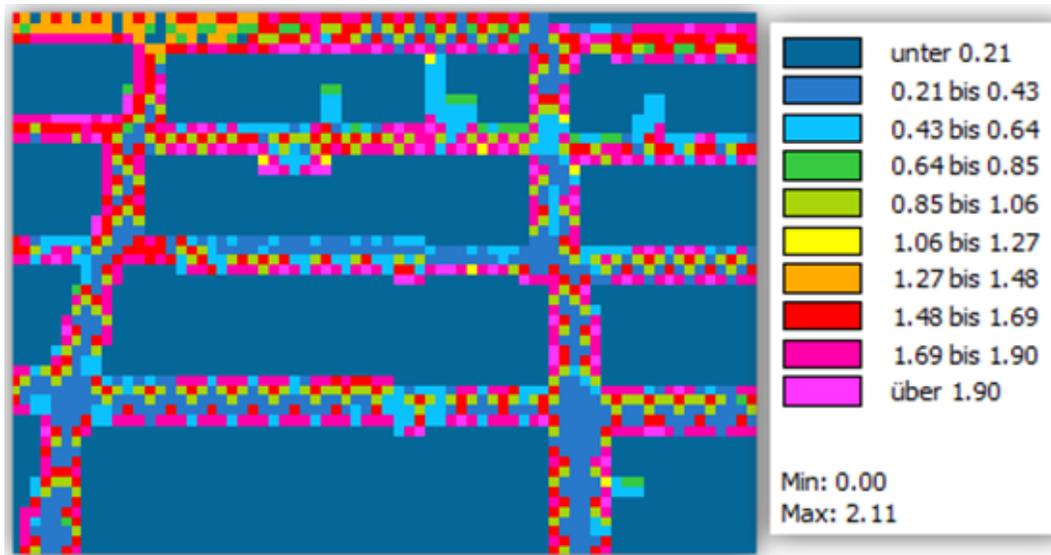


Figura 75: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos SA y CA. Fuente: La autora, 2017.

- En la Figura 76, están las diferencias entre los valores PMV del modelo con la arborización original AO y con arborización CA, valores positivos indican que estos son mayores en el modelo AO.

Los valores PMV varían entre -1.15 y 1.95. En la mayor parte donde hay árboles en el modelo CV y no hay en el modelo AO, las diferencias de los valores PMV están encima de 1.33. Los valores negativos son observados en algunos lugares donde hay arborización en los dos modelos, más la distancia entre las árboles en el modelo AO (5 metros) es menor que en el modelo CV (10 metros), o sea la mayor densidad de los árboles resulta en una disminución del índice PMV. Donde las calles son amplias, los valores PMV en el centro de la pista son ligeramente mayores para el modelo AO (0.09 a 0.40 mayor). Donde las calles son estrechas y no hay árboles en el modelo AO, el valor PMV en el centro de la pista son bastante mayores para el modelo AO.

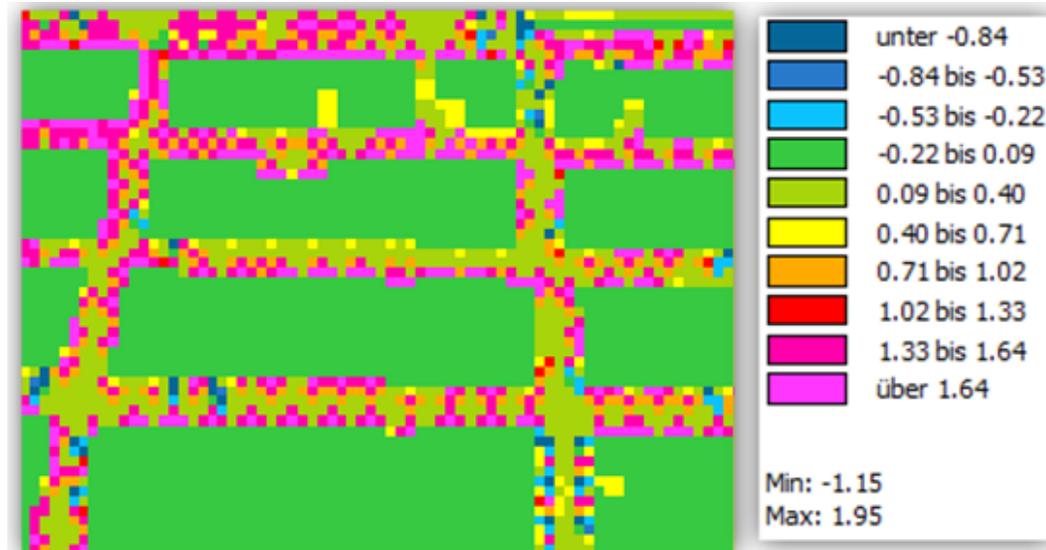


Figura 76: Diferencias del Índice de confort medido a las 12:00 entre los modelos AO y CV. Fuente: La autora, 2017.

### viii) Efectos de la sombra de casas y edificios en el Índice de confort PMV

El sol nace en el este y se pone en el oeste, lo cual influencia también el confort térmico por proporcionar sombra de las casas, edificios, en un lado de la calle y en el otro no. Para ver si el ENVI-met simula correctamente el movimiento del sol, veamos las Figuras del índice PMV a las 09:00, 12:00 y 15:00 horas.

- En la Figura 71, se muestran los valores del PMV a las 12:00 horas, se observa muy poca sombra de casas y edificios, lo cual es correcto, pues al medio día el sol está ubicado perpendicularmente al suelo.
- La Figura 77, muestra los valores del PMV a las 09:00 horas, se observa sombra de casas y edificios dirigida para el oeste, lo cual es correcto, pues el sol nace del este y a las 09:00 horas sigue ubicado en lado este. Os valores PMV varían entre 2.44 y

4.96, siendo que los menores valores son precisamente donde se observa la sombra de casas y edificios

- La Figura 78, muestra los valores del PMV a las 15:00 horas, se observa sombra de casas y edificios dirigida para el este, lo cual es correcto, pues el sol se pone al oeste y a las 15:00 horas está en el lado oeste. Os valores PMV varían entre 4.51 y 7.26, siendo que los menores valores son precisamente donde se observa la sombra de casas y edificios. Este es un horario donde se observa un aumento considerable del índice de confort PMV. Las personas evitan caminar en este horario, pues la sensación térmica es muy alta y la incidencia de rayos UV es más perjudicial, recomendándose el uso de protector solar.
- En relación con el movimiento del sol, concluimos que el ENVI-met consiguió simular correctamente la sombra de las casas, edificios y también de los árboles considerados en la simulación.

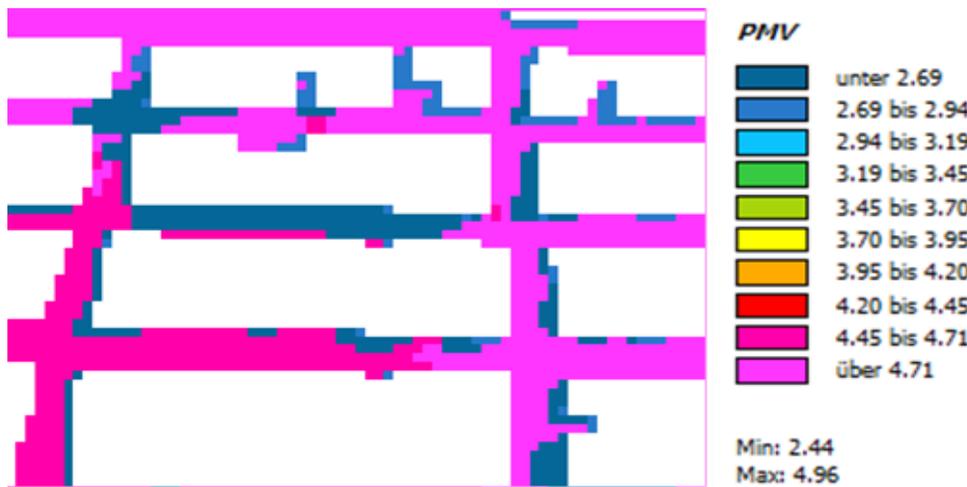


Figura 77: Índice de confort medido a las 09:00 horas en el modelo SA. Fuente: La autora, 2017.



Figura 78: Índice de confort medido a las 15:00 horas en el modelo SA. Fuente: La autora, 2017.

#### ix) Índice de confort PMV a las 15:00 horas del día 20/07/2017

En la Figura 79, se presentan las diferencias entre los valores PMV de los modelos sin arborización SA y con arborización CA a las 15:00 horas. Valores positivos indican que los valores PMV del modelo SA son mayores.

La diferencia de valores varia ahora entre un mínimo de 0.31 y un máximo de 3.29. Las mayores diferencias se dan nuevamente donde hay arborización y no hay sombra. Los menores valores se dan en las pistas de calles amplias donde las arboles no consiguen dar sombra. La sombra de los edificios y casas consiguen reducir el valor PMV para menos de 0.91.

En este horario se observa la grande influencia de arborizar una ciudad, principalmente si es de región ecuatorial como Macapá, pues según la simulación del ENVI-met consigue reducir hasta +3 puntos el índice de confort PMV.

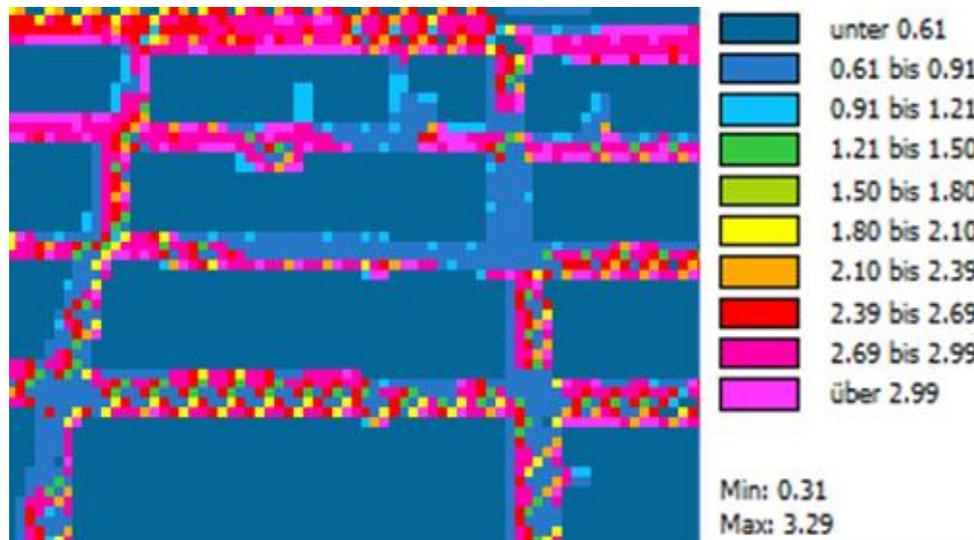


Figura 79: Diferencias del Índice de confort medido a las 15:00 entre los modelos SA y CV. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.12. Resultados del Índice de Disconfort Térmico – PPD

Analizamos los resultados de las simulaciones numéricas para el índice de disconfort térmico PPD, en cada uno de los escenarios SA, AO, CA y en cada uno de los receptores simulados en el ENVI-met. Los valores numéricos de las series temporales son descritos en el Anexo A.

##### i) Series temporales del índice PPD en el receptor R1

En la Figura 80 y en la Tabla B1 (APÉNDICE C) se presentan los valores PPD (%) para los modelos SA, AO y CA. Donde se observa los siguientes resultados:

- Entre las 07:00 y las 15:00 horas los valores llegan al máximo valor PPD de disconfort (100%);
- los menores valores PPD, próximos de 10%, están en las primeras horas de simulación entre las 03:00 y las 06:00 horas del día 20/07/2017, y en el final de la

simulación entre las 01:00 y 05:00 horas del día 21/07/2017 con valores PPD menores a 40%;

- las diferencias entre los valores PPD, para el receptor R1, son mejor observadas en el Gráfico 52 (SA-CA, SA-AO y AO-CA) y en la Tabla C2 (APÉNDICE C).

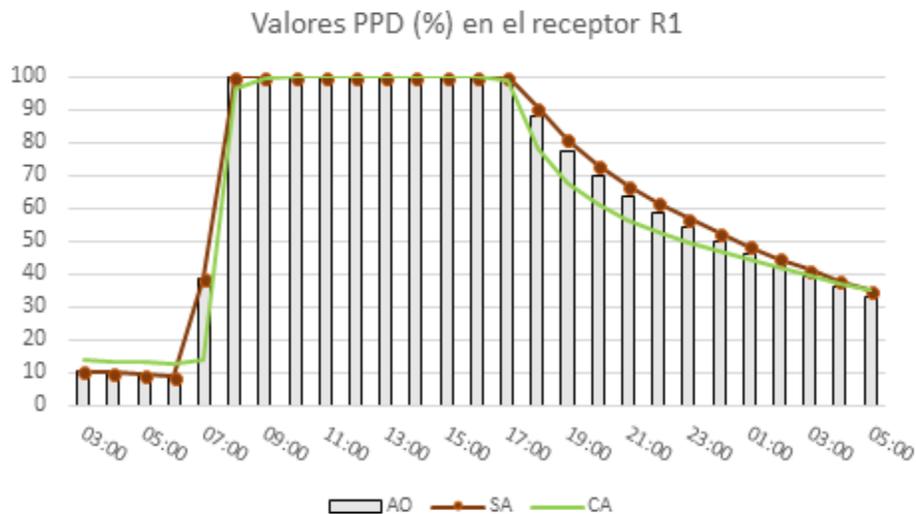


Figura 80: Valores PPD (%) en el receptor R1 para los modelos SA, AO y CA.

Fuente: La autora, 2017.

- Las diferencias SA-AO (línea verde), entre los modelos sin arborización y el modelo con la arborización original, son positivas caso los valores en SA sean mayores que en AO. Se observa que hasta las 17:00 horas los valores entre los dos modelos son muy próximos, luego de esa hora los valores del modelo SA son ligeramente mayores (un mayor discomfort), alcanzando un máximo de 3,2 % a las 20:00 horas (Figura 81);
- Las diferencias AO-CA (línea marrón), entre los modelos con arborización original y el modelo con arborización, son positivas caso los valores en AO sean mayores que en CA. Los valores son negativos al inicio de la simulación (03:00 a 05 horas

del día 20/07/2017), con una diferencia mayor de -3.78% a las 06:00 horas y al final de la simulación (03:00 a 05:00 horas del día 21/07/2017) con un pico de -1,8% a las 05:00 horas, indicando que en estos períodos hay un ligero discomfort mayor en el modelo con vegetación CA. A las 07:00 horas hay un pico máximo de +24.5%, en el cual el discomfort en el modelo AO es más acentuado. Entre las 09:00 y 15:00 horas la diferencia entre los valores es nula, pues ambos llegan a 100% de discomfort, de las 16:00 horas del día 20/07/2017 a las 02:00 del día 21/07/2017 los valores del modelo AO son mayores con un pico de 9.7% a las 19:00 horas;

- las diferencias SA-CA (barras), entre los modelos sin arborización y el modelo con arborización, son positivas caso los valores en SA sean mayores que en CA el comportamiento es similar a lo discutido en las diferencias AO-CA, excepto que las diferencias son positivas al final de la simulación, con un pico mayor de 13,0% a las 19:00 horas.

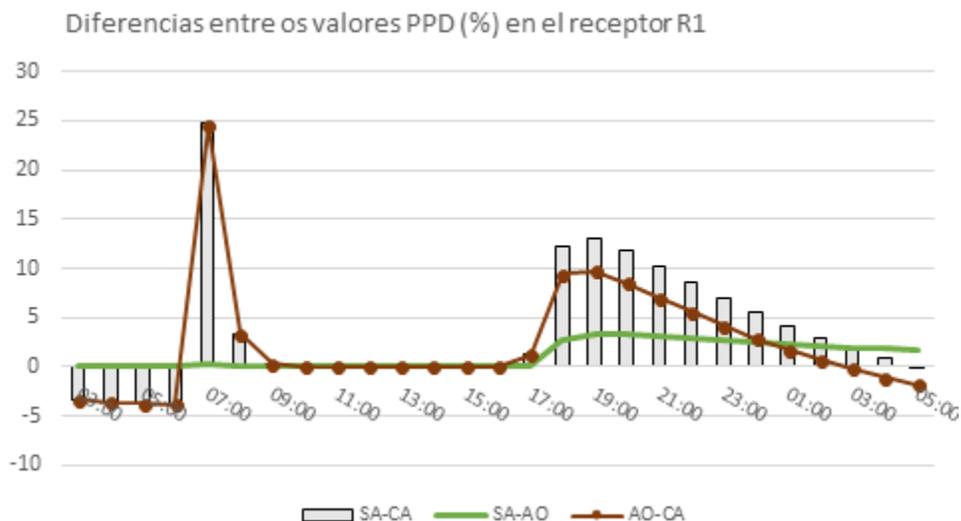


Figura 81: Valores PPD (%) en el receptor R1 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA. Fuente: La autora, 2017.

El comportamiento de los valores PPD en los receptores R2 y R3 son similares a los valores en el receptor R1, inicialmente valores bajos en torno de 10%, seguido por un período con 100% de discomfort y luego disminuye próximo a 40% en las horas finales de la simulación. Por esto, presentamos a continuación solamente los resultados de las diferencias del índice PPD entre los modelos.

## **ii) Diferencia de los valores PPD en las series temporales en el receptor R2**

En la Figura 82, se observa las diferencias de los valores PPD (%) entre los tres modelos SA, AO y CA. Donde se observan los siguientes resultados:

- La diferencia del PPD entre los modelos SA y AO (línea verde) son las menores en relación a los otros modelos, más en relación al receptor R1 hay una diferencia más negativa (el modelo CV presenta mayor discomfort) en el inicio y final de la simulación, con picos de -4.9% a las 05:00 horas del día 20/07/2017 y de -4.1% a las 05:00 horas del día 21/07/2017, ver Tabla C3 (APÉNDICE C);
- La diferencia entre los modelos AO y CA (línea marrón) son negativas (mayor discomfort en el modelo CA) entre las 03:00 y las 07:00 horas del día 20/07/2017 con pico de -2.9% a las 07:00 horas. A las 08:00 horas se observa un pico positivo (mayor discomfort en el modelo AO) de +28.5% y a partir de las 16:00 horas los valores son siempre positivos (mayor discomfort en el modelo AO) con pico de +10.5% a las 19:00 horas.

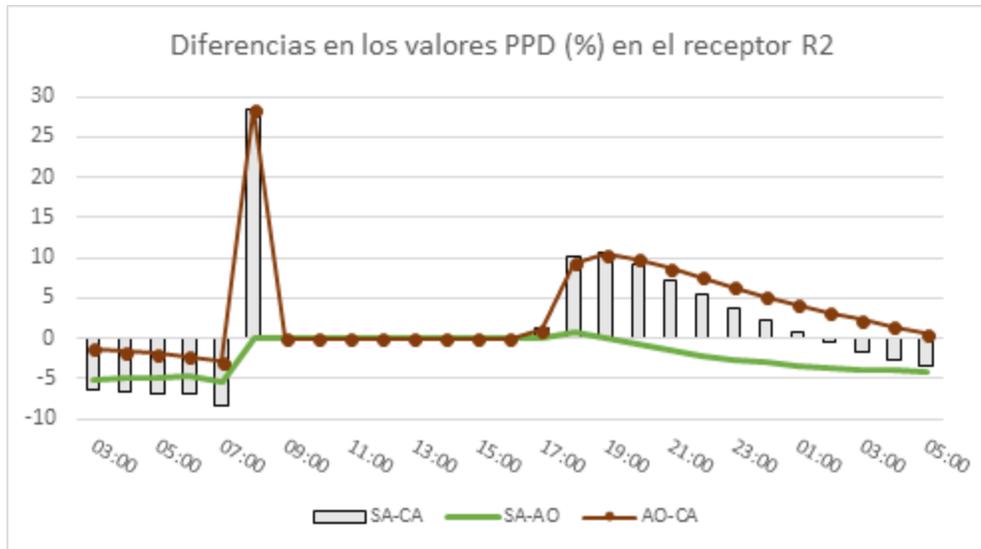


Figura 82: Valores PPD (%) en el receptor R2 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA. Fuente: La autora, 2017.

### iii) Diferencia de los valores PPD de las series temporales en el receptor R3

En la Figura 83 se observa que:

- Las diferencias de los valores PPD entre los valores del modelo sin arborización SA y con arborización CA son más acentuadas que en el receptor R1 y R2;
- se observa ahora dos picos positivos (mayor discomfort en el modelo SA) de +27.0% a las 07:00 horas y de 40,6% a las 08:00 horas, ver Tabla C4 (APÉNDICE C);
- también se observa un pico positivo de +18.1% entre los modelos SA y AO (mayor discomfort en el modelo SA).

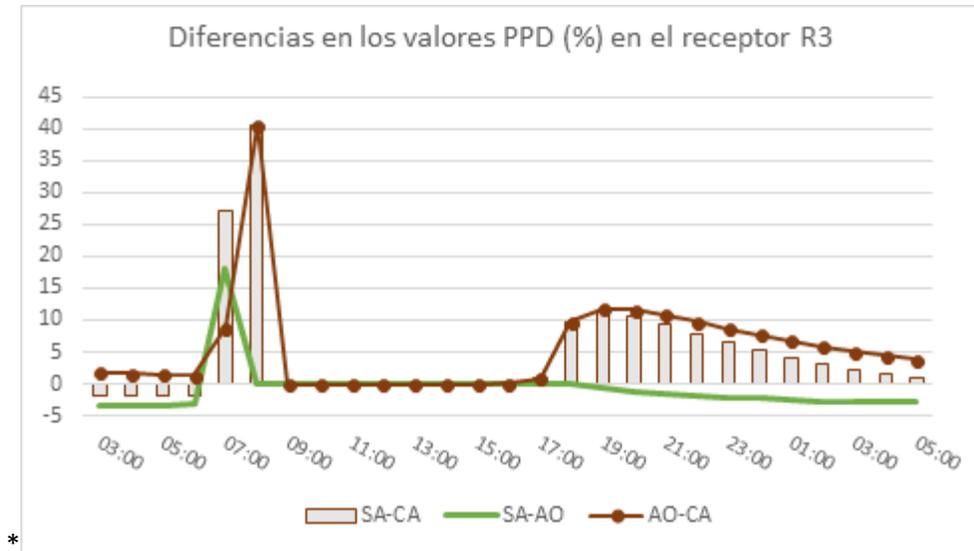


Figura 83: Valores PPD (%) en el receptor R3 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.13. Resultados de la temperatura del suelo en las simulaciones numéricas del ENVI-met

Los datos de la temperatura del suelo mostraran diferencias significativas con relación a la densidad de arborización. Describimos ahora los resultados de las simulaciones numéricas en los tres escenarios con diferente densidad de arborización.

##### i) Perfil temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1

La Figura 84 muestra la variación temporal en el receptor R1, el cual es un punto que presenta poca arborización, de los modelos AS (sin arborización), AO (con regular arborización) y CA (con bastante arborización). Donde se observa los siguientes resultados:

- la temperatura máxima del suelo ocurre a las 11:00 en los tres modelos, con valor máximo de 53.45 °C en el modelo SA, 53.05 °C en el modelo AO y de 52.48 °C en el modelo CA;
- en el inicio y final de la simulación la temperatura del suelo de los tres modelos son bastantes próximos, con una diferencia hasta de 0.75°C menor para el modelo CA;
- las temperaturas del suelo de los modelos SA y AO son bastantes próximos, lo cual se justifica por el hecho que ambos modelos no presentan árboles en este punto;
- se observa que la temperatura del suelo del modelo CA presenta los menores valores, principalmente entre las 07:00 y 15:00 horas del día 20/07/2017;
- a las 11:00h la temperatura del solo no modelo CA es 14.16 °C menor que la temperatura del suelo en el modelo AO y 14.38 °C menor que la temperatura del suelo del modelo SA, ver Tabla D1 (APÉNDICE D).

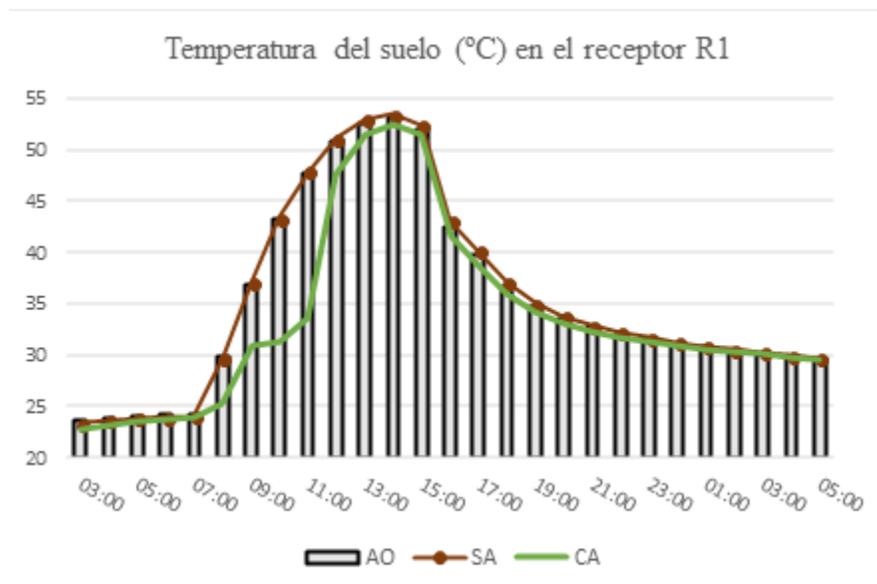


Figura 84: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1.

Fuente: La autora, 2017.

## ii) Perfil temporal de la temperatura del suelo en el receptor R2

En la Figura 85 y la Tabla D2 (APÉNDICE D), muestra la variación temporal en el receptor R2, el cual es un punto que presenta regular arborización, de los modelos AS, AO y CA. Donde se observa los siguientes resultados:

- los valores de la temperatura máxima del suelo en los modelos son de 53.72°C a las 14:00 horas en el modelo SA, 49.07°C a las 11:00 horas, en el modelo AO y 48.61°C a las 11:00 horas en el modelo CA;
- las diferencias máximas de la temperatura del suelo entre los modelos son de 14.14°C mayor para SA con relación a AO, 15.00°C mayor para AO con relación al modelo CA y 14.95°C mayor para el modelo SA con relación al modelo CA;
- en general los modelos CA e SA presentan los menores y mayores valores de la temperatura del suelo respectivamente. El modelo AO tiene valores de la temperatura del suelo más próximos al modelo CA en toda la serie temporal.

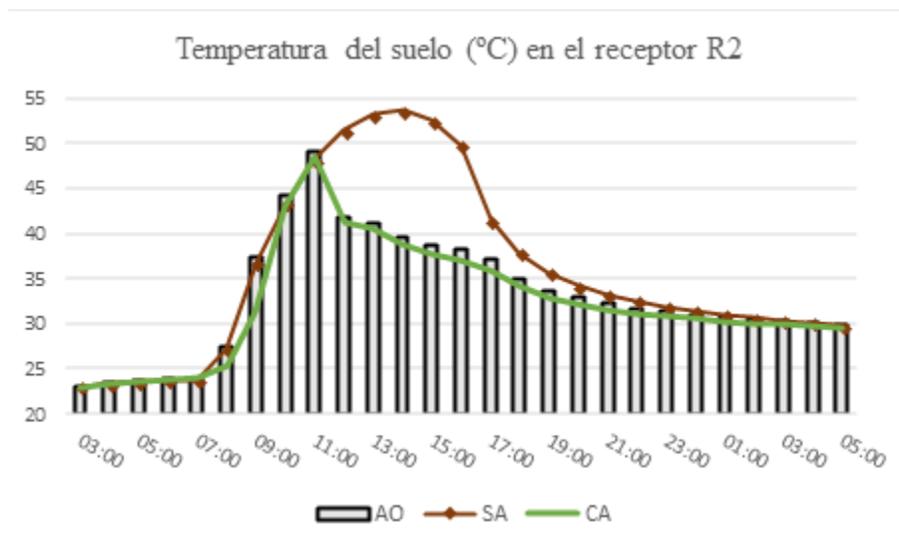


Figura 85: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1. Fuente: La autora, 2017.

### **iii) Perfil temporal de la temperatura del suelo en el receptor R3**

En la Figura 86 y la Tabla D3 (APÉNDICE D), muestra la variación temporal en el receptor R3, el cual es un punto que presenta regular arborización, de los modelos AS, AO y CA. Donde se observa los siguientes resultados:

- Los valores de la temperatura máxima del suelo en los modelos son de: 51.89°C a las 14:00 horas en el modelo SA, 53.38°C a las 13:00 horas en el modelo AO y 47.16 a las 11:00 horas en el modelo CA;
- las diferencias máximas de la temperatura del suelo entre los modelos son de 6.72°C mayor para el modelo SA con relación al modelo AO, 13.89°C mayor para el modelo AO con relación al modelo CA y 13.85°C mayor para el modelo SA con relación al modelo CA;
- nuevamente el modelo CA presenta los menores valores de la temperatura del suelo, el modelo SA los mayores valores de la temperatura del suelo. Se observa ahora, que el modelo AO tiene valores de la temperatura del suelo intermediarios entre los valores de los modelos SA y CA en toda la serie temporal. El receptor R3 está a las 15:00 horas cubierto por la sombra de las casas, ya que el sol en este horario está del lado este, lo que explica las diferencias menores entre los tres modelos.

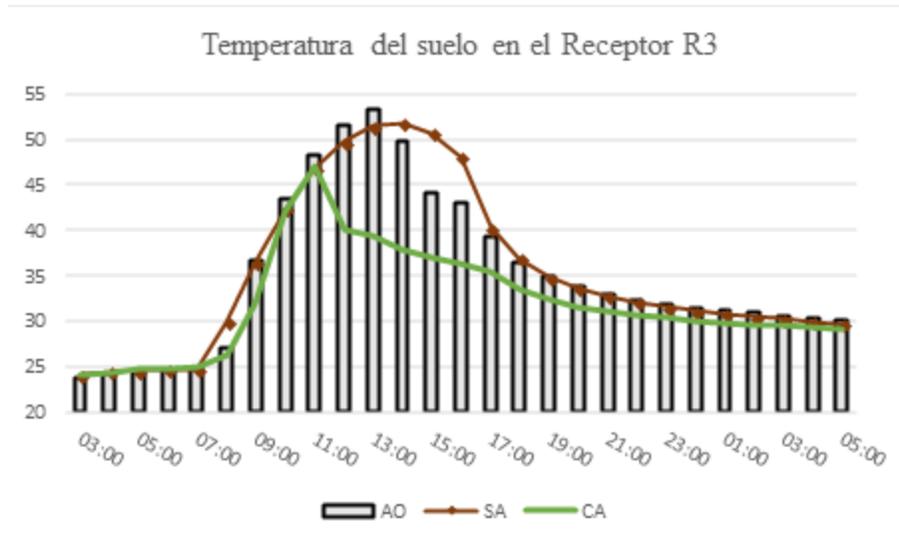


Figura 86: Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R3.

Fuente: La autora, 2017.

#### iv) Diferencias de temperatura del suelo entre los modelos SA y CA

En la Figura 87 se muestra las diferencias de la temperatura del suelo en °C entre el modelo SA y el modelo CA a las 15:00 horas del 20/07/2017, una diferencia positiva indica que la temperatura del suelo es mayor en el modelo SA. Donde se observa los siguientes resultados:

- Las diferencias en el valor de la temperatura del suelo son más acentuadas en todas las calles arborizadas en el modelo CA;
- la diferencia máxima de la temperatura del suelo entre los dos modelos es de +21.35°C, indicando que la arborización en el modelo CA consigue disminuir los efectos de la radiación solar;
- las menores diferencias se presentan donde hay sombra de los edificios, pues el sol ahora está del lado este en la región de la simulación;

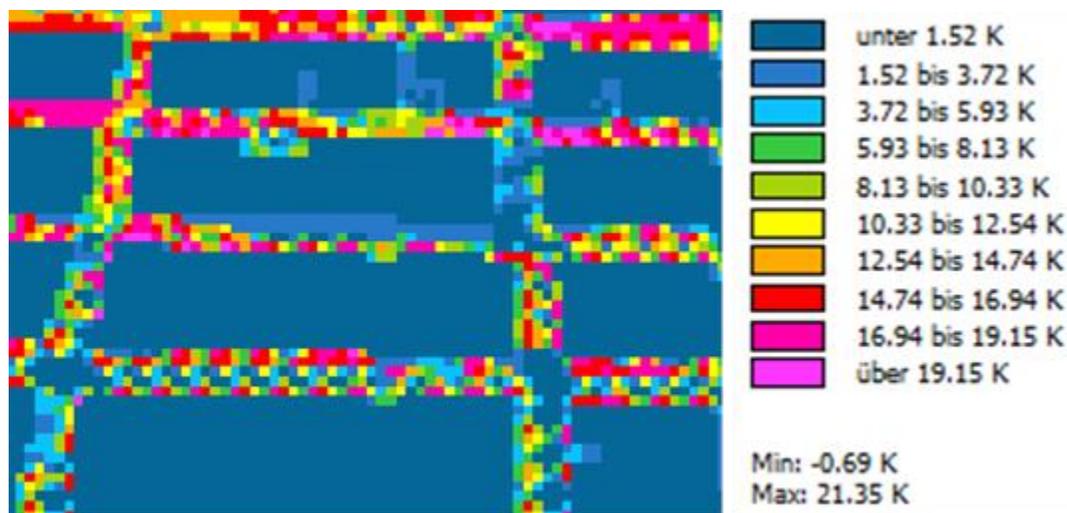


Figura 87: Diferencia de temperatura del suelo entre los modelos SA y CA.

Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.14. Resultados de la humedad relativa en las simulaciones del ENVI-met

Los datos de la humedad relativa mostraran diferencias significativas con relación a la densidad de arborización. Describimos ahora los resultados de las simulaciones numéricas en los tres escenarios con diferente densidad de arborización.

##### i) Perfil temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R1

En la Figura 88 y en la Tabla E1 (APÉNDICE E), se muestra la serie de tiempo de la humedad relativa (%) para los modelos SA (sin arborización), AO (con la arborización original) y CA (completamente arborizado) en el receptor R1. Donde se observan los siguientes resultados:

- Se observa que los valores de la humedad relativa del modelo SA es menor que la de los otros modelos y que los valores del modelo AO son muy próximos a las del modelo SA;

- Los valores de la humedad relativa del modelo CA son hasta 12.36% mayores a las 05:00 del día 21/07/2017.

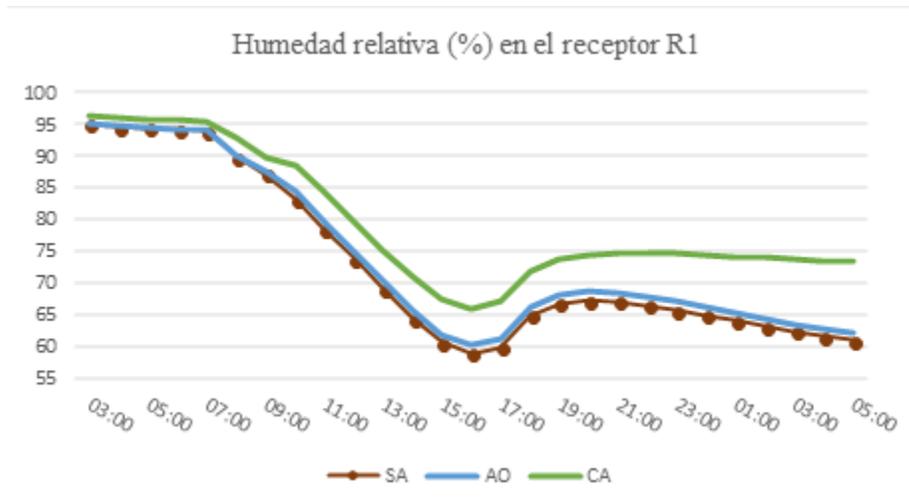


Figura 88: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R1.

Fuente: La autora, 2017.

## ii) Perfil temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R2

En la Figura 89 y en la Tabla E2 (APÉNDICE E), se muestra la serie de tiempo de la humedad relativa (%) para los modelos SA, AO y CA en el receptor R2. Donde se observan los siguientes resultados:

- Se observa que los valores de la humedad relativa del modelo SA es menor que la de los otros modelos y que los valores del modelo AO se distanciaron un poco más que la del modelo SA cuando comparado al receptor R1;
- los valores de la humedad relativa del modelo CA son hasta 12.47% mayores a las 05:00 del día 21/07/2017 con relación a los valores del modelo SA;

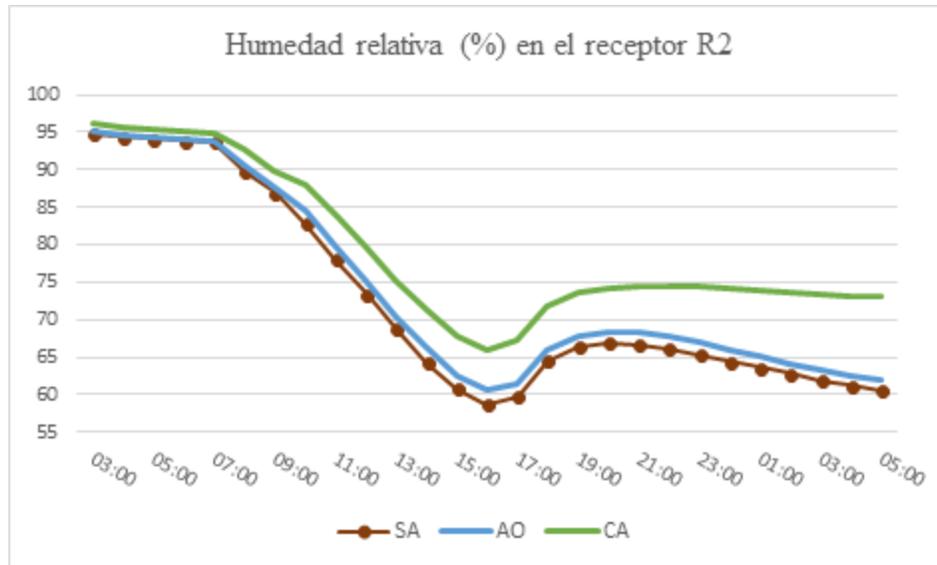


Figura 89: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R2.

Fuente: La autora, 2017.

## ii) Perfil temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R3

En la Figura 90 y en la tabla E3 (APÉNDICE E), se muestra la serie de tiempo de la humedad relativa (%) para los modelos SA, AO y CA en el receptor R3. Donde se observan los siguientes resultados:

- Se observa que los valores de la humedad relativa del modelo SA es nuevamente menor que la de los otros modelos y que los valores del modelo AO mantuvo la diferencia que los valores del modelo SA cuando comparado al receptor R2;
- los valores de la humedad relativa del modelo CA son hasta 11.86% mayor a las 05:00 del día 21/07/2017 en relación con los valores del modelo SA;

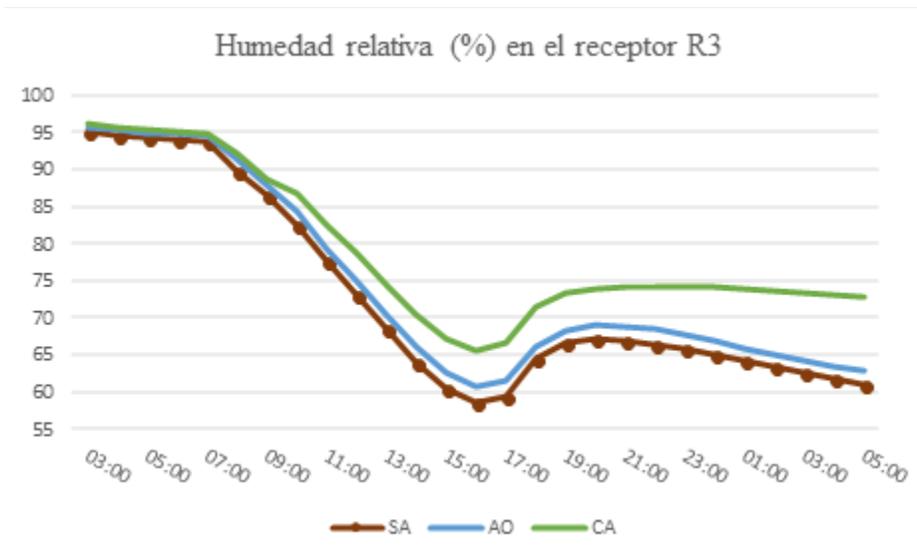


Figura 90: Serie temporal de la humedad relativa (%) en el receptor R3.

Fuente: La autora, 2017.

#### iv) Diferencias de la humedad relativa entre los modelos SA y CA

En la Figura 91 se muestra las diferencias entre los valores de la humedad relativa del modelo SA y el modelo CA, una diferencia positiva indica que los valores son mayores en el modelo SA y una diferencia negativa indica que los valores son menores en el modelo CA.

Las diferencias de los valores de la humedad relativa son entre 4.82% y 9.70% mayores en el modelo CA. Los valores predominantes están entre 6.29% a 7.75% mayores en el modelo CA.

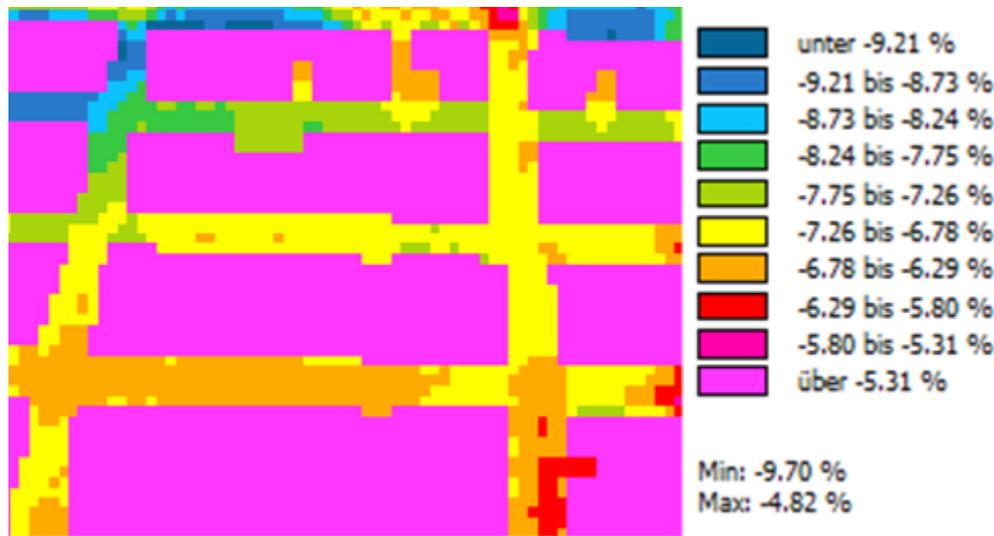


Figura 91: Diferencia en la humedad relativa entre los modelos SA y CA. Fuente La autora, 2017.

#### 4.1.2.15. Resultados de la velocidad del viento en las simulaciones del ENVI-met

Los datos de la velocidad del viento mostraran diferencias significativas con relación a la densidad de arborización. Describimos ahora los resultados de las simulaciones numéricas en los tres escenarios con diferente densidad de arborización.

##### i) Perfil temporal de la velocidad del viento (%) en el receptor R1

En la Figura 92 y Tabla F1 (APÉNDICE F), se observa que la velocidad del viento con el modelo con arborización es menor que en los otros modelos en toda la serie temporal, con diferencia de 0.47m/s a las 04:00 horas del día 20/07/2017. La velocidad del viento del modelo AO es ligeramente mayor que los valores del modelo SA, en ningún de estos dos modelos hay árboles en el receptor R1.

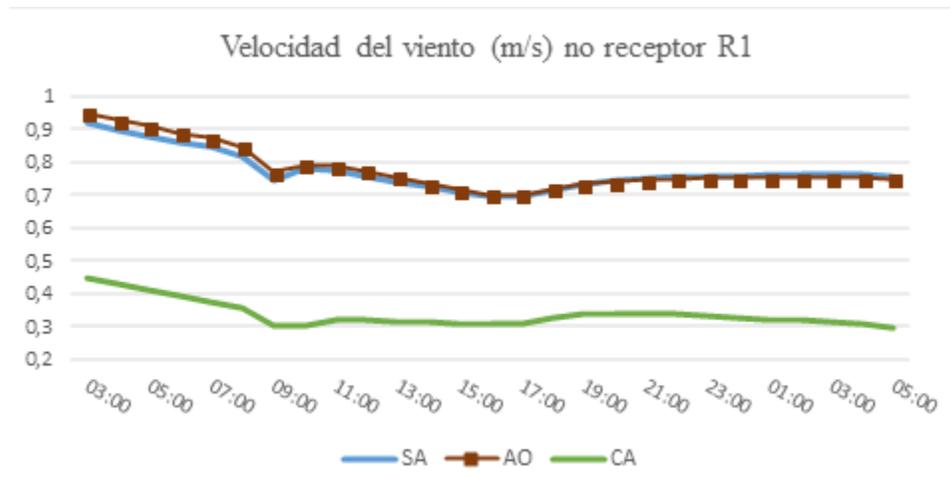


Figura 92: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R1. Fuente: La autora, 2017.

**ii) Perfil temporal de la velocidad del viento (%) en el receptor R2**

En la Figura 93 y Tabla F2 (APÉNDICE F), se observa que,

- la velocidad del viento con el modelo con arborización sigue siendo menor que los otros modelos en toda la serie temporal y los valores del modelo SA son los mayores observados en la serie temporal;
- la velocidad del viento en el modelo AO se distanció de los valores del modelo SA, debido a la presencia de regular arborización en el receptor R2;
- los valores del modelo AO son intermediarios entre los valores de los modelos SA y CA;
- la diferencia entre los valores de la velocidad del viento en los modelos, es de: 0.29 m/s mayor en el modelo SA a las 05:00 horas del día 20/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo AO, 0.2 m/s mayor en el modelo AO a las 05:00 horas del día 21/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo CA y

0.49 m/s mayor en el modelo SA a las 04:00 horas del día 20/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo CA;

- el ENVI-met detecto que en el modelo SA no hay árboles y que en el modelo AO hay menos árboles que el modelo CA, alrededor del receptor R2.

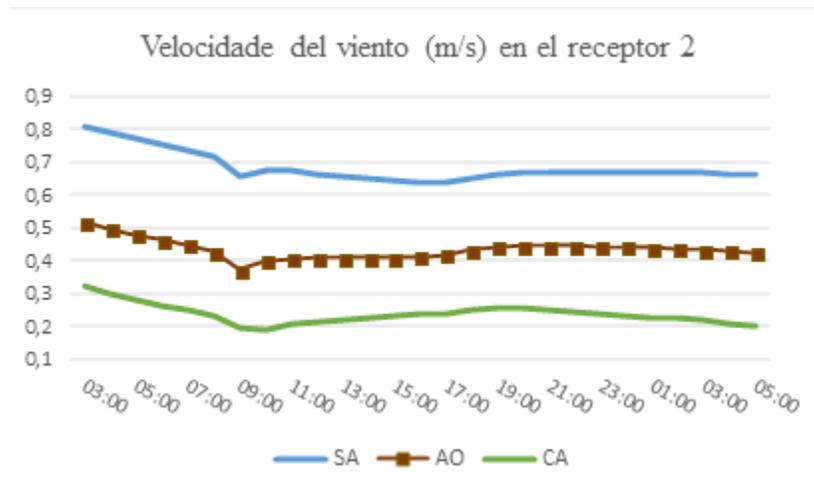


Figura 93: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R2. Fuente: La autora, 2017.

### iii) Perfil temporal de la velocidad del viento (%) en el receptor R3

En la Figura 94 y Tabla F3 (APÉNDICE F), se observa que,

- la velocidad del viento con el modelo sin arborización es mayor que los otros modelos en toda la serie temporal;
- los valores de la velocidad del viento del modelo AO son ligeramente menores que los valores del modelo CA, el ENVI-met está detectando que en este punto del receptor R3, hay más árboles en el modelo AO (la distancia entre dos árboles consecutivos es de 5 a 7.5 metros) que en el modelo CA (aquí la distancia entre dos árboles consecutivos es siempre de 10 metros);

- la diferencia entre los valores de la velocidad del viento en los modelos, es de 0.51 m/s mayor en el modelo SA a las 03:00 horas del día 20/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo AO, 0.11 m/s menor en el modelo AO a las 05:00 horas del día 20/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo CA y 0.40 m/s mayor en el modelo SA a las 05:00 horas del día 21/07/2014, cuando comparado a los valores del modelo CA.

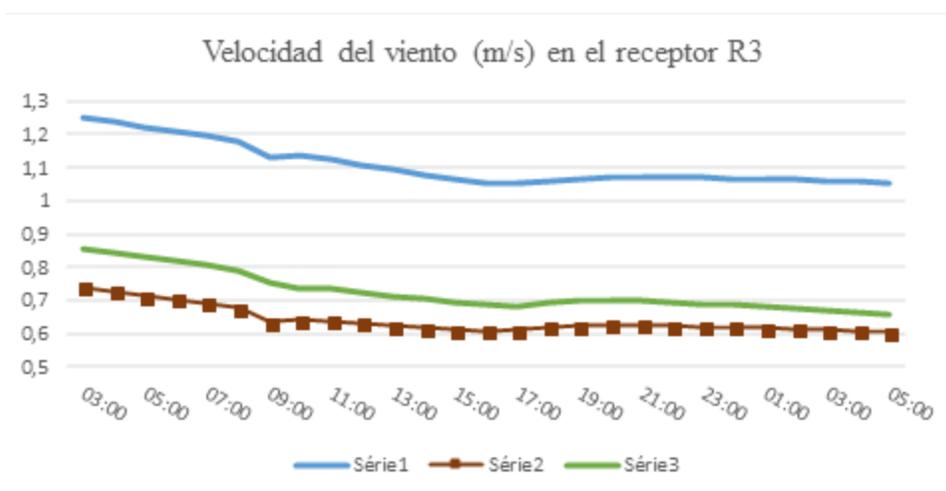


Figura 94: Serie temporal de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R3. Fuente: La autora, 2017.

#### 4.1.2.16. Resultados de la temperatura del aire en las simulaciones del ENVI-met

Los datos de la temperatura del aire mostraran diferencias significativas con relación a la densidad de arborización. Describimos ahora los resultados de las simulaciones numéricas en los tres escenarios con diferente densidad de arborización.

### i) Perfil temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R1

En la Figura 95 y en la Tabla G1 (APÉNDICE G), se muestran las series temporales de la temperatura del aire a la altura de 1.50 metros en el receptor R1 para los modelos SA, AO y CA.

Donde se observa los siguientes resultados:

- La temperatura del aire es menor en el modelo con arborización completa CA (línea verde) en comparación con los otros dos modelos;
- el modelo sin arborización SA (línea marrón) es el que tiene la mayor temperatura, siendo que el modelo con la arborización original AO (barras) tiene valores ligeramente mayores que el modelo SA;
- las diferencias máximas de las temperaturas entre los modelos verifican que en el modelo SA es 0.37°C mayor que en el modelo AO, a las 17:00 horas, en el modelo AO es 1.15°C mayor que el modelo CA, a las 18:00 horas y en el modelo SA es 1,50°C mayor que el modelo CA, a las 18:00 horas;

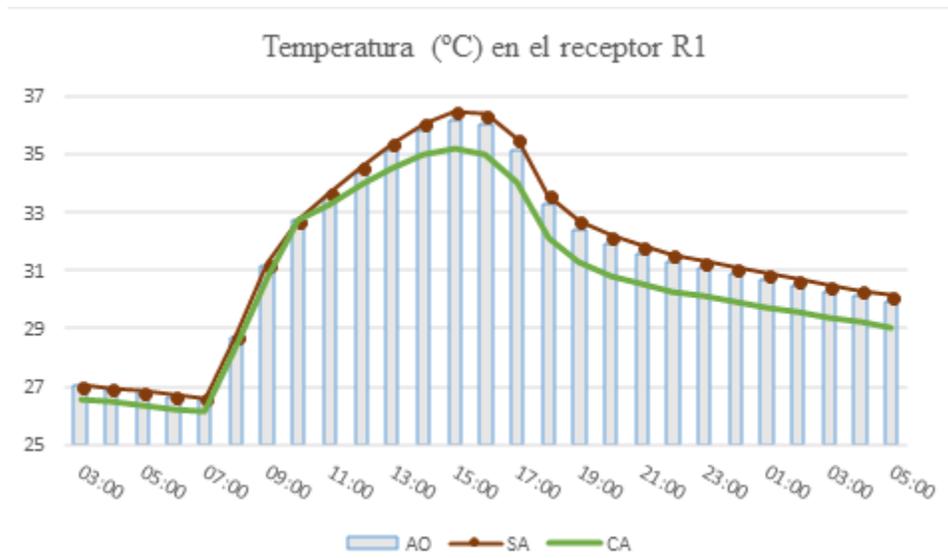


Figura 95: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R1. Fuente: La autora, 2017.

## ii) Perfil temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R2

En la Figura 96 y en la Tabla G2 (APÉNDICE G), se muestran las series temporales de la temperatura del aire a la altura de 1.50 metros en el receptor R2 para los modelos SA, AO y CA.

- la temperatura del aire es nuevamente menor en el modelo con arborización completa CA (línea verde) en comparación con los otros dos modelos.;
- el modelo sin arborización SA (línea marrón) es el que tiene la mayor temperatura del aire, siendo que ahora los valores del modelo con la arborización original AO (barras) se aleja un poco más del modelo SA;
- las diferencias máximas de las temperaturas entre los modelos verifican que en el modelo SA es 0.38°C mayor que el modelo AO, a las 15:00 horas, en el modelo AO es 1.14°C mayor que el modelo CA, a las 18:00 horas y en el modelo SA es 1,54°C mayor que el modelo CA, a las 18:00 horas.

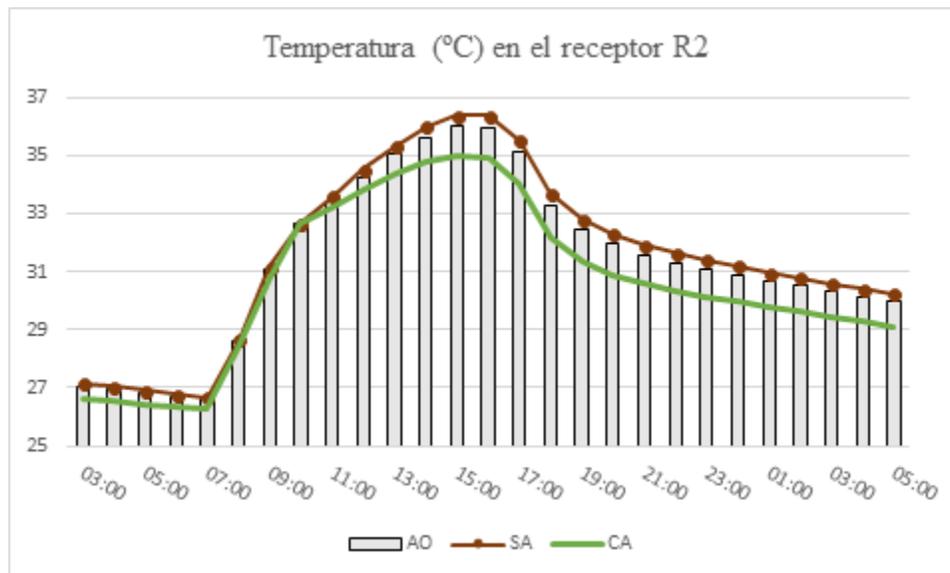


Figura 96: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R2. Fuente: La autora, 2017.

### iii) Perfil temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R3

En la Figura 97 y en la Tabla G3 (APÉNDICE G), se muestran las series temporales de la temperatura del aire a la altura de 1.50 metros en el receptor R3 para los modelos SA, AO y CA.

La temperatura del aire en los tres modelos sigue un patrón similar al observado en el receptor R2. Las diferencias máximas de las temperaturas entre los modelos verifican que en el modelo SA es 0.45°C mayor que el modelo AO, a las 17:00 horas, en el modelo AO es 1.07°C mayor que el modelo CA, a las 18:00 horas y en el modelo SA es 1,48°C mayor que el modelo CA, a las 17:00 horas.

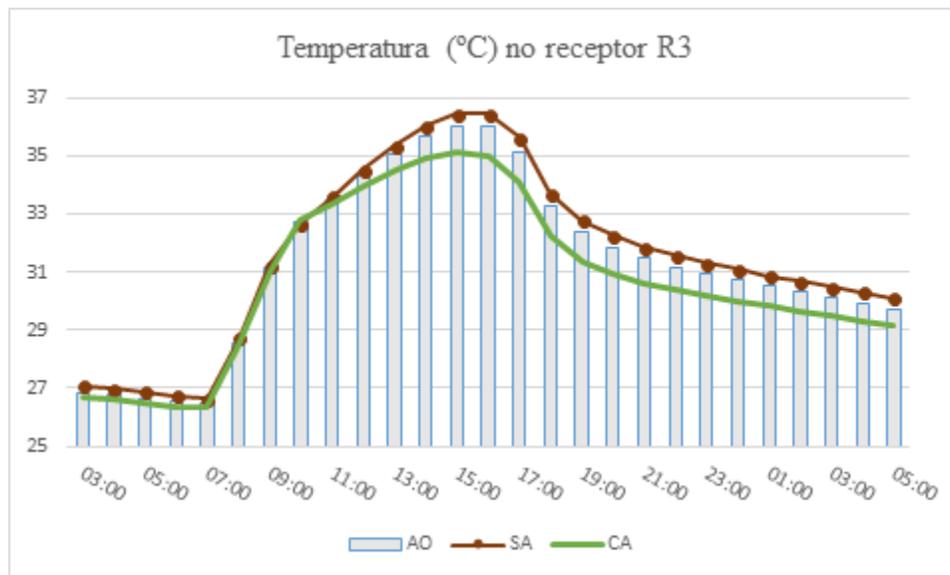


Figura 97: Serie temporal de la temperatura del aire (°C) en el receptor R3. Fuente: La autora, 2017.

#### iv) Diferencias de temperatura del aire entre los modelos SA y CA

En la Figura 98, se presenta la diferencia entre las temperaturas de aire a las 15:00 horas, entre los modelos sin arborización (SA) y con arborización completa (CA), de modo que una diferencia positiva indica que la temperatura del aire es mayor en el modelo SA. Esto nos permite analizar en un campo bidimensional, como las simulaciones en el ENVI-met detectan la influencia de la arborización en la temperatura del aire.

Se observa que la temperatura del aire es siempre mayor, hasta 1,81°C, en el modelo SA. En la mayoría de las calles la temperatura en el modelo SA es 1.0 a 1.5°C mayor en relación al modelo CA.

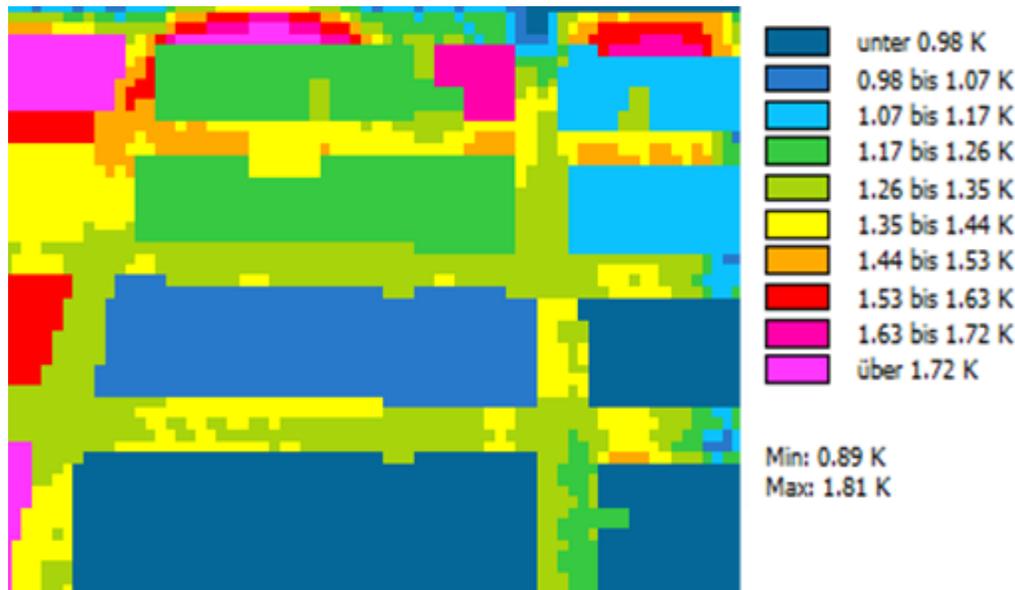


Figura 98: Diferencia en la temperatura del aire entre los modelos SA y CA. Fuente: La autora, 2017.

## **4.2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

### **4.2.1. Influencia de la pavimentación en el confort térmico urbano**

De la descripción de los datos de la temperatura superficial del suelo se analizó la influencia del tipo de material usado en la pavimentación y de la densidad de la arborización en el confort térmico urbano. De este análisis, se sigue que:

- La temperatura superficial en el asfalto es siempre mayor que la temperatura superficial en la vereda, la que a su vez es siempre mayor que la temperatura en la base de los árboles, independientemente del lugar de la medición. Las características y propiedades del asfalto, cemento y tierra para retener la radiación solar determinan el valor de las temperaturas aquí observadas. Existen diversos tipos de materiales a ser usado en la pavimentación de las calles y avenidas, cada uno con diferentes efectos sobre la temperatura superficial y por lo tanto sobre el confort térmico urbano. Se hace necesario por tanto estudiar las propiedades de los materiales para escoger la pavimentación adecuada al lugar, como es el caso de climas ecuatoriales húmedos considerados en este estudio;
- Se verifica que la densidad de la arborización provoca grandes variaciones en los valores de la temperatura superficial del suelo. En la ausencia de árboles, la radiación solar incide directamente en la superficie del suelo aumentando la temperatura, con la presencia de árboles se adiciona el efecto sombra y parte de la radiación solar es absorbida o reflejada por los árboles.
- La temperatura superficial del suelo en el asfalto disminuye hasta 23.0°C cuando se compara un lugar con abundante arborización con otro lugar caracterizado pela ausencia

de árboles, en cuanto disminuye 17.4°C cuando se compara un lugar con regular arborización con otro que no tiene árboles. La temperatura superficial del suelo en la vereda disminuye hasta 23.8°C cuando se compara un lugar con abundante arborización con otro lugar caracterizado pela ausencia de árboles, en cuanto disminuye 13.1°C cuando se compara un lugar con regular arborización con otro que no tiene árboles.

- La temperatura superficial del suelo en la base de los árboles disminuye hasta 15.2°C cuando se compara un lugar con abundante arborización con otro lugar con regular arborización. Los resultados sugieren de un planeamiento adecuado para arborizar la ciudad de Macapá debido a las altas temperaturas presentes, la sombra de los árboles es asegurada considerando por su perennidad de hojas durante todo el año.

#### **4.2.2. Influencia de densidad de arborización en la temperatura del aire**

De las mediciones de la temperatura del aire en la Tabla 9, se observa que:

- cuando comparamos el punto sin arborización y el punto con abundante arborización la temperatura del aire disminuye 1.9°C a las 12:00 horas y disminuye 2.9°C a las 15:00 horas. Cuando son comparados el punto sin arborización y el punto con regular arborización la temperatura del aire disminuye 1.6°C a las 12:00 horas y disminuye 1.5°C a las 15:00 horas. Cuando son comparados el punto con regular arborización la temperatura del aire disminuye 0.3°C a las 12:00 horas y de 1.4°C a las 15:00 horas. Así, en los períodos diurnos 09:00 y 12:00 horas la temperatura del aire disminuye hasta cerca de 3°C con el aumento

de la densidad de la arborización. En estos horarios las temperaturas son máximas causando un gran discomfort térmico, siendo que las personas en la ciudad de Macapá evitan caminar en las calles o practicar algún deporte en estos horarios. Esto también tiene consecuencias económicas, pues las ventas disminuyen en estos horarios y los comerciantes tienen que invertir en centrales de aire para mantener una temperatura adecuada durante todo el período de atendimento, siendo que el costo de la energía es bastante elevado en esta ciudad;

- se observa poco efecto de la densidad de la arborización en la temperatura del aire a las 06:00 y 21:00 horas, debido a la poca incidencia de radiación solar. Entretanto en las noches la temperatura mínima en espacios libres es siempre mayor que 25°C, lo cual está de acuerdo con los valores observados en la Tabla 09. Dentro de espacios cerrados, como casas y departamentos, la temperatura en las noches en la ciudad de Macapá es de cerca de 30°C, siendo difícil dormir sin el uso de centrales de aire o ventiladores.

El análisis de los resultados muestra que la densidad de la arborización tiene influencia positiva en la temperatura del aire, pues al aumentar la densidad de los árboles se observa una disminución de hasta 3°C en esta temperatura, mejorando el índice de confort térmico urbano.

#### **4.2.3. Influencia de densidad de la arborización en la humedad relativa del aire**

De las mediciones de la humedad relativa del aire en la Tabla 10, se observa:

- Todos los valores de la humedad relativa son mayores que 70%, encima de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que considera el nivel ideal de la humedad

relativa entre 40% y 70%. La humedad regula la evaporación, por lo que desempeña un importante papel en las altas temperaturas, en las que la sudoración es uno de los mecanismos más importantes de enfriamiento. Sin embargo, en situaciones cálidas, cuando la humedad sobrepasa el 60% y, sobre todo, el 80%, la sensación de calor aumenta, ya que se produce el sudor, pero no evaporación, dando lugar al clásico bochorno o calor húmedo;

- se observa que en la media diaria la humedad relativa es mayor cuando aumenta la densidad arbórea, lo cual debería causar mayor discomfort por los valores ser mayores que 70%, entretanto el análisis debe considerar los efectos conjuntos de la humedad relativa y de la temperatura del aire en el confort térmico;
- en el periodo diurno el aumento en la densidad arbórea origina una disminución de la temperatura del aire y un ligero aumento de la humedad relativa. Por ejemplo, a las 15:00 horas tenemos una temperatura de 35.1°C y una humedad relativa de 72.4% en el punto sin arborización, con estos valores la sensación térmica es próxima de los 50°C. En cuanto a las 15:00 horas se tiene una temperatura de 32.1°C y humedad relativa de 75.9%, con estos valores la sensación térmica es próxima de 40.0°C. Se observa, por tanto, una disminución de la sensación térmica en aproximadamente 10°C, ocasionando un mejor confort térmico urbano;
- en las noches la temperatura del aire es próxima de 26°C y la humedad relativa próxima de 80% para los tres puntos con diferente densidad arbórea, con estos valores la sensación térmica es de aproximadamente 28°C, la cual supera los 30°C en ambientes cerrados como las casas y apartamentos. Esta sensación térmica hace muy difícil dormir en Macapá sin el uso de ventiladores o centrales de aire, con alto costo por el uso de energía eléctrica.

El análisis de los resultados muestra que la densidad de la arborización tiene influencia positiva en la humedad relativa, pues junto con la temperatura del aire disminuye la sensación térmica en periodo diurno con alta incidencia de radiación solar, mejorando el índice de confort térmico urbano.

#### **4.2.4. Influencia de la densidad de arborización en la velocidad del viento**

De las mediciones de la velocidad del viento en la Tabla 11, se observa que la velocidad del viento tiende a disminuir con el aumento de la densidad de arborización, la velocidad media del viento disminuye de 1.48 m/s en el ponto sin arborización a 1.24 m/s en el ponto con abundante arborización.

El movimiento del aire aumenta la disipación de energía por evaporación y convección siempre que la temperatura del cuerpo sea inferior a la del aire. En lugares con temperaturas más amenas los vientos ayudan a reducir la temperatura sentida por las personas, a pérdida de calor es intensificada por el viento.

Cuando las temperaturas son altas el cuerpo humano intenta se enfriar por el sudor, ayudando así a disminuir la temperatura corporal, sin embargo, en ciudades ecuatoriales como Macapá donde las temperaturas llegan próximas a los 40°C el viento aumenta la sensación de calor, la presencia de los árboles disminuye la intensidad de los vientos mejorando los índices de confort térmico urbano.

#### 4.2.5. Influencia de la densidad de arborización en el índice de confort – PMV

La influencia de la densidad de arborización en el índice de confort – PMV fue analizada con las simulaciones en el ENVI-Met para tres escenarios: SA (sin arborización), AO (arborización original) y AC (arborización completa) y en cada escenario en tres receptores diferentes R1, R2 y R3. Verificamos que:

- considerando el modelo hipotético SA, se observa que los valores del PMV son similares en todos los horarios en los puntos R1, R2 y R3, lo cual es correcto ya que la incidencia de rayos solares es similar ante la ausencia de arborización. Los valores del PMV son mayores que +3 en el periodo de las 08:00 a las 17:00 horas donde la incidencia de los rayos solares es más intensa, estos valores llegan próximos de +7 a las 15:00 horas;
- considerando el modelo AO, que simula la configuración real de calles, edificios y árboles de la Avenida Leopoldo Machado, se observa una diferencia de 2.5 en el valor PMV del receptor R1 a las 15:00 horas en relación con el receptor R2. La simulación consigue capturar las diferencias entre las diferentes densidades de arborización en los receptores;
- considerando el modelo hipotético CA, con las calles completamente arborizadas, la diferencia en el valor PMV es de 3.5 a las 15:00 horas, indicando que la simulación consigue detectar la densidad de la arborización;
- los valores PMV son próximos para los modelos AO y CV, por lo cual analizamos el factor de la sombra de las casas y edificios usando gráficos bidimensionales;
- fue verificado que las simulaciones numéricas consiguieran simular correctamente la sombra de las casas, edificios y de los árboles consideradas en cada configuración de los modelos.

- A las 09:00 horas, en el modelo la sombra de las casas se dirige para el oeste, lo cual es correcto pues el sol nace del este, con valores PMV entre 2.44 y 4.96 con los menores valores donde se observa la sombra de casas y edificios. A las 15:00 horas, se observa sombra de casas y edificios dirigida para el este, lo cual es correcto, pues el sol se pone al oeste, con valores PMV entre 4.51 y 7.26.

A las 15:00 horas se observa un aumento considerable del índice de confort PMV. Las personas evitan caminar en este horario, pues la sensación térmica es muy alta y la incidencia de rayos UV es más perjudicial, recomendándose el uso de protector solar.

La diferencia de valores varia ahora entre un mínimo de 0.31 y un máximo de 3.29. Las mayores diferencias se dan nuevamente donde hay arborización y no hay sombra. Los menores valores se dan en las pistas de calles amplias donde los árboles no consiguen dar sombra. La sombra de los edificios y casas consiguen reducir el valor PMV para menos de 0.91. En el periodo de mayor radiación solar se observa la grande influencia de arborizar una ciudad, principalmente si es de región ecuatorial como Macapá, pues según la simulación del ENVI-met consigue reducir hasta +3 puntos el índice de confort PMV.

#### **4.2.6. Influencia de la densidad de arborización en el índice de discomfort – PPD**

La influencia de la densidad de arborización en el índice de discomfort – PPD fue analizada con las simulaciones en el ENVI-met para tres escenarios: SA (sin arborización), AO (arborización original) y AC (arborización completa) y en cada escenario en tres receptores diferentes R1, R2 y R3. Verificamos que:

- Entre las 07:00 y 15:00 horas, donde hay mayor radiación solar, el índice de discomfort PPD es máximo en los tres escenarios con diferente densidad arbórea, o sea 100% de las personas desean que la sensación térmica sea menor, característico de zonas cálidas como es la ciudad de Macapá;
- entre las 03:00 y 06:00 horas el índice PPD es próximo de 10% y entre las 17:00 y 05:00 horas del día siguiente decrece de 100% a 40%, acompañando a cantidad de radiación solar;

En todos los casos fue observado que el modelo con vegetación tiene los menores valores del índice de discomfort PPD si comparado a los otros dos modelos y el modelo con la arborización original tiene valores menores que el índice de discomfort PPD que el modelo sin arborización. Estas simulaciones muestran la importancia de la densidad de la arborización en las ciudades para mejorar el confort térmico urbano.

#### **4.2.7. Influencia de la densidad arbórea en la temperatura del suelo – ENVI-met 4.0**

La influencia de la densidad de arborización en la temperatura del suelo fue analizada con las simulaciones en el ENVI-met para tres escenarios: SA (sin arborización), AO (arborización original) y AC (arborización completa) y en cada escenario en tres receptores diferentes R1, R2 y R3. Verificamos que:

- Las series temporales en el modelo AO, que reproduce de modo realista las condiciones de los árboles, casas y edificios, consiguen capturar el efecto de la densidad de arborización en la temperatura del suelo. Los valores de la temperatura

del suelo en el receptor R1 es mayor que en el Receptor R2 y a temperatura en el Receptor R2 es mayor que en el Receptor R3;

- los valores de la temperatura del suelo en el modelo AO se muestran compatibles con los valores observados en las mediciones con el termómetro infrarrojo, así las simulaciones numéricas reproducen el comportamiento observado de la temperatura del suelo;
- en todos los casos, tanto en los perfiles temporales, como de las diferencias en el área simulada entre cualquier dos de los modelos, se observa el efecto positivo de la disminución de la temperatura del suelo por la arborización de la ciudad;

El análisis de las series temporales de la temperatura del suelo en los tres receptores muestra que los valores de los resultados numéricos del ENVI-met 4.0 son compatibles con los valores obtenidos con los aparatos de medición. Fue verificado que la arborización tiene grande influencia para disminuir la temperatura del suelo.

#### **4.2.8. Influencia de la densidad arbórea en la humedad relativa- ENVI-met 4.0**

Los valores de la humedad relativa a 1.5 metros, obtenidos con la simulación del ENVI-met con el padrón observado en las mediciones obtenidas con los aparatos de medida, esto es, en los puntos con mayor arborización es observada una mayor humedad relativa.

O aumento de la arborización hace que la humedad relativa del aire aumente en los alrededores de cada árbol, lo cual en temperaturas altas puede causar mayor discomfort. Entretanto, el aumento de la densidad de arborización disminuye la temperatura al mismo tiempo que aumenta

la humedad relativa, como discutido en 4.2.3, el resultado es una sensación térmica más confortable.

En las series de tiempo en los receptores, se observa que los valores de la humedad relativa en los modelos SA y AO se mantienen próximos, en cuanto los valores en el modelo CA son más distantes. Esto también indica la influencia global de la arborización al aumentar la humedad en el ambiente, pues mismo en el modelo AO en los lugares con árboles, los valores de la humedad relativa siguen siendo mayores en el modelo CA.

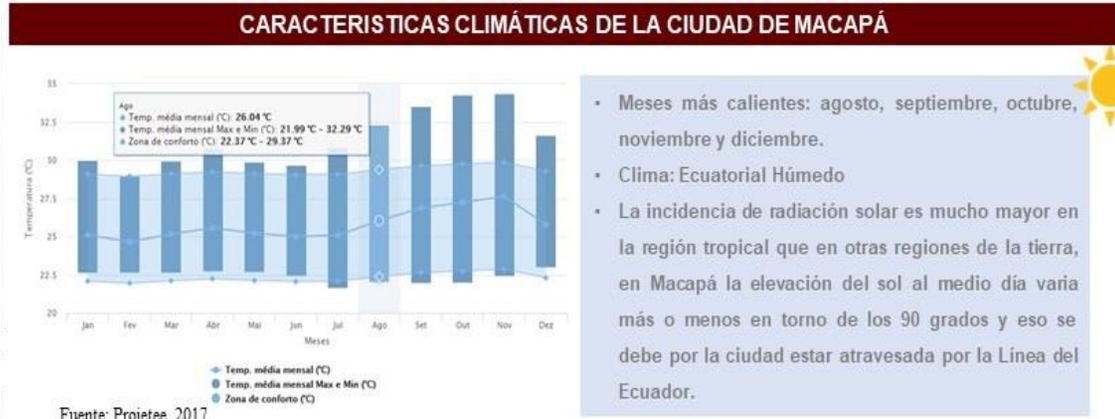
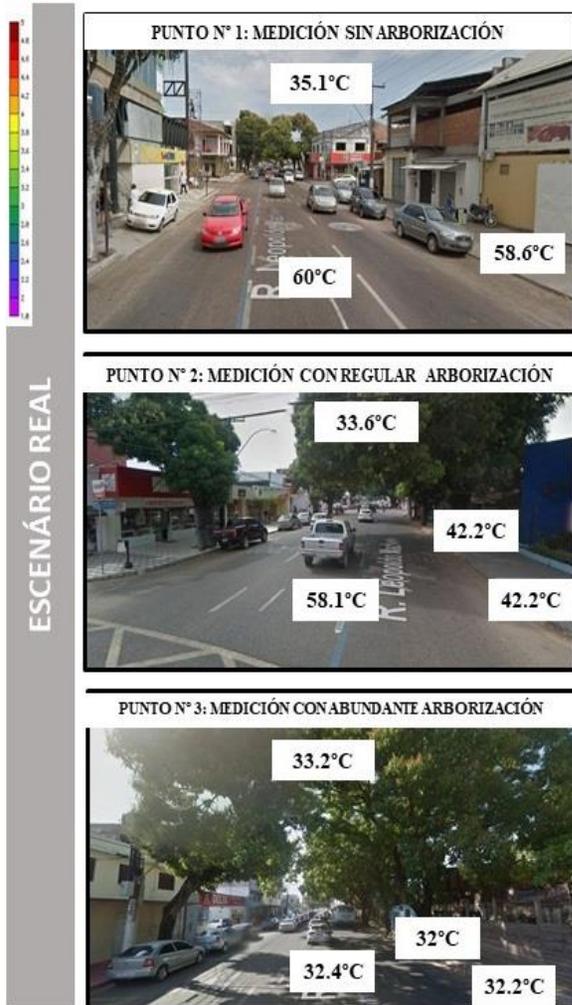
#### **4.2.9. Influencia de la densidad arbórea en la velocidad del viento – ENVI-met 4.0**

En las simulaciones numéricas de la velocidad del viento con el ENVI-met se puede observar como en el modelo con vegetación completa (CA) la velocidad del viento es más débil que en el modelo sin arborización (SA). La dirección del viento en ambos modelos es predominantemente del este en las calles situadas horizontalmente y del sur en las calles verticales en la región de simulación.

Los valores de la velocidad del viento resultantes de la simulación numérica son compatibles con los valores observados en las mediciones con el anemómetro, valores inferiores a 2m/s, por lo cual no interfieren en la sensación térmica de las personas. Las hojas y ramas de los árboles ayudan a disminuir la velocidad del viento, aumentando el confort de las personas, visto que los vientos fuertes dispersan la humedad promovida por los árboles, haciendo que no sea más percibida.

Las simulaciones del ENVI-met para los tres modelos considerados consiguen detectar correctamente el impacto de los árboles en la velocidad y dirección de los vientos, por lo cual se espera que consiga reproducir escenarios con velocidades de viento mayores.

A seguir en la figura 99 se presenta un mapa infográfico que demuestra los principales resultados encontrados y las diferencias de temperatura en los tres puntos de medición en el escenario real y en el escenario simulado.



### ESCENARIO SIMULADO - ENVI-met 4.0

Índices de PMV			
	R1	R2	R3
Modelo SA	6.9539	6.9	6.8828
Modelo AO	6.7824	4.5712	4.8518
Modelo CA	6.2523	4.0772	3.6722

Temperatura del Suelo			
	R1	R2	R3
Modelo SA	53.454	53.718	51.885
Modelo AO	53.053	39.582	49.748
Modelo CA	52.479	38.766	37.91

Humedad Relativa %			
	R1	R2	R3
Modelo SA	64.364	64.32	64.03
Modelo AO	65.618	66.152	66.123
Modelo CA	70.869	71.372	70.518

Velocidad del viento m/s			
	R1	R2	R3
Modelo SA	0.72308	0.64737	1.0793
Modelo AO	0.7343	0.40851	0.61788
Modelo CA	0.3115	0.22667	0.70343

Figura 99: Mapa infográfico de los resultados encontrados en el escenario real vs simulado. Fuente: La autora, 2017

## **5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

Los datos colectados en los tres puntos de observación permitieron analizar la influencia de los materiales usados en la pavimentación y en la densidad arbórea en el microclima urbano de la Avenida Leopoldo Machado.

El análisis de los resultados confirma que el tipo de material usado en la pavimentación influye en la temperatura del suelo, los valores llegan próximos de 60°C en el asfalto debido a que la radiación solar directa, es muy elevada en la ciudad ecuatorial de Macapá. Fue verificado también que la densidad de arborización influye en la temperatura del suelo, la cual disminuye hasta 25°C con el aumento de la densidad de arborización.

El análisis de las mediciones in loco, comprueban que el aumento en la densidad de arborización en la Avenida Leopoldo Machado disminuye la temperatura del suelo, aumenta la humedad relativa del aire, disminuye la intensidad de los vientos y disminuye la temperatura del aire, cuyos efectos combinados disminuyen la sensación térmica de calor, permitiendo un mejor confort térmico urbano y consecuentemente de las personas.

El ENVI-met 4.0 ha sido testado con suceso en diversos microclimas urbanos, principalmente en medias y altas latitudes, entretanto no hay estudios en ciudades cortadas pela línea del ecuador. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el ENVI-met reproduce correctamente el microclima urbano en la latitud cero.

Los resultados de las simulaciones en el ENVI-met 4.0 con el escenario real de la Avenida Leopoldo Machado mostró que las variables micro climáticas tienen comportamiento similar a los datos observados, la temperatura del suelo llega a 55°C, la humedad relativa es alta, principalmente en el periodo de mayor radiación solar directa, la intensidad de la velocidad de los vientos con valores máximos de 1.5m/s y la disminución de la temperatura del aire en 2°C, reproduciendo en todos los casos los datos observados.

Los resultados positivos de las simulaciones numéricas en el escenario real nos permiten hacer simulaciones en escenario con ningún árbol y simulaciones con escenario completamente arborizado. Todos los resultados muestran que las variables micro climáticas en el escenario completamente arborizado permiten menores índices de confort PMV y de disconfort PPD, que el escenario sin árboles y por tanto un mejor confort térmico urbano.

La presencia de arborización urbana en las ciudades como visto anteriormente contribuyen y asumen un papel importante en el confort térmico urbano, debido a la estabilidad micro climática que proporcionan, disminuyendo la temperatura y aumentando la humedad relativa del aire. En áreas donde la arborización no es presente, la incidencia a la radiación solar es directa en el medio urbano, así como el calentamiento de las superficies del suelo, por lo tanto, las temperaturas se elevan considerablemente, ya que el medio urbano no recibe el sombreado de los árboles.

La arborización urbana, en el paisaje urbano tiene diversas funciones, principalmente en los beneficios físicos y climáticos. Se puede entender entonces que la arborización urbana ultrapasa el papel únicamente estético para la ciudad, su funcionalidad está mucho más allá de lo que se puede imaginar, tienen un papel importante en el resfriamiento del microclima de la ciudad. En ciudades donde la presencia de árboles es prácticamente inexistente, es una tarea complicada el

manejo y dedicación de plantío de árboles recomendadas para áreas urbanas, ya que está condicionado al planeamiento urbano mediante al poder público.

El beneficio de la arborización urbana tiene que estar aliada al crecimiento de la población en las ciudades, es necesario que haya un pensamiento verde y un desenvolvimiento sustentable para nuestra generación y principalmente la generación futura. Los beneficios de la arborización son inúmeros y su importancia puede ser crucial en el futuro, ya que un cuarto de millón de personas puede morir a cada año debido al calentamiento urbano hasta el año 2050, según datos de la OMS (2014).

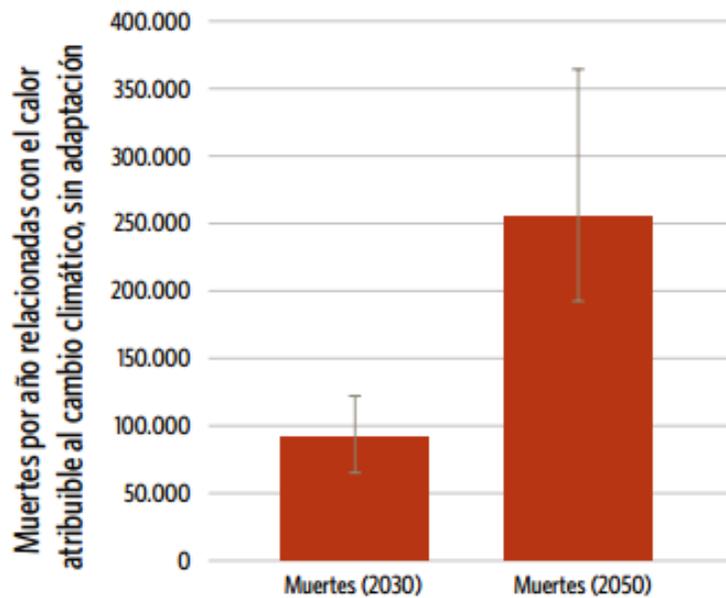


Figura 100: Muertes por año relacionados con el calor. Fuente: OMS, 2014.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Como recomendación para el poder público y a los ciudadanos de manera en general se tiene como propuesta desarrollar en la avenida Leopoldo Machado, un corredor verde urbano, para la

mejoría de las altas temperaturas encontradas en el clima ecuatorial húmedo, así proporcionando a las personas un mejor confort térmico en función del diseño urbano climatológicamente orientado.

A seguir, se presenta la propuesta del corredor verde (figura 101) y algunos fotomontajes señalando el antes y después, realizados para mejor entendimiento de lo que se quiere proporcionar a la población macapaense y servir de ejemplo para otras ciudades brasileñas que poseen baja densidad de arborización en su ambiente urbano.

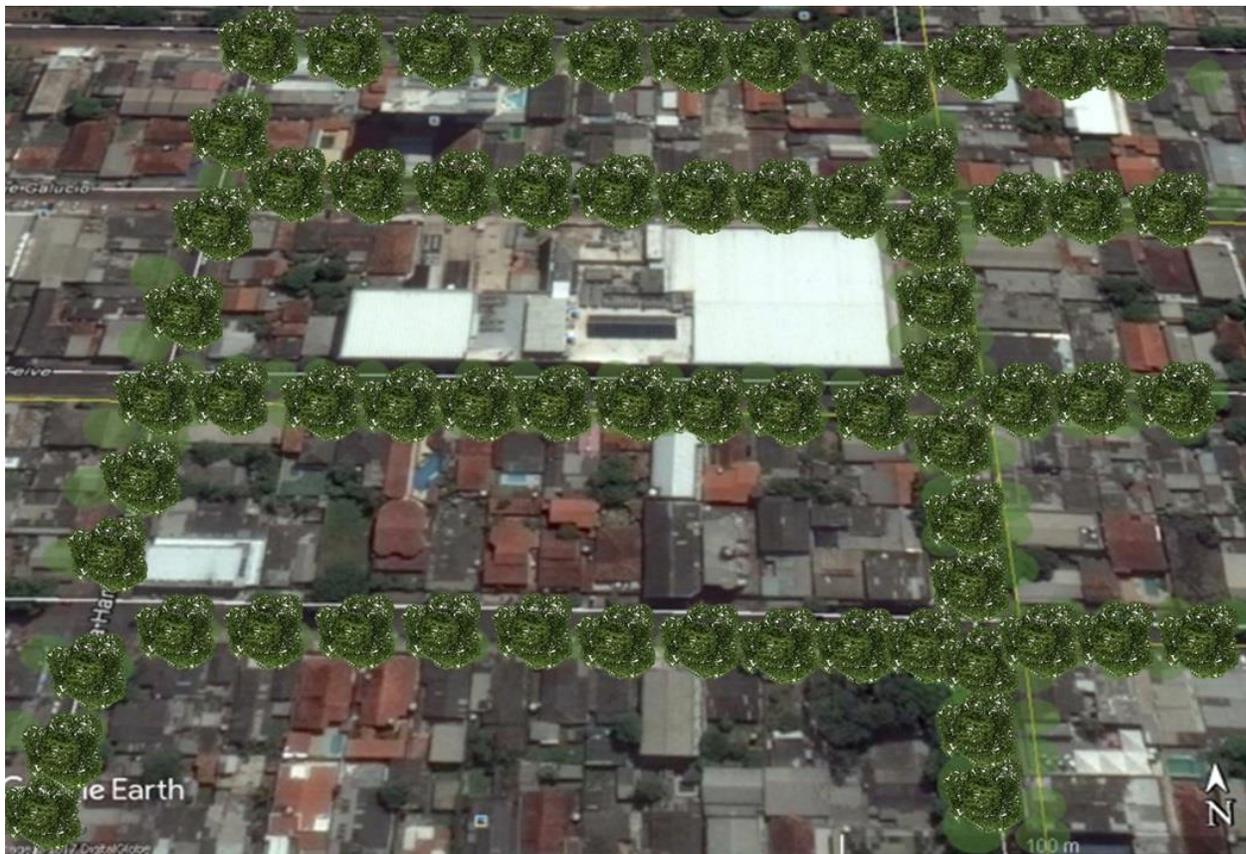


Figura 101: Propuesta corredor verde en la Av. Leopoldo Machado. Fuente: La autora, 2017.

Por lo tanto, como recomendación para el confort térmico urbano es la utilización de avenidas con más densidades arbóreas. Se busca también el mejoramiento de la morfología de la

ciudad mediante el uso adecuado de material de pavimentación y la creación de áreas de descanso, de puntos de ómnibus con cobertura e iluminación pública, como se puede observar en las Figuras 102 y 103.



Figura 102: Morfología urbana rediseñada. Fuente: La autora, 2017.



Figura 103: Propuesta de mayor densidad arbórea en la vía urbana. Fuente: La autora, 2017.

También se busca la creación de ciclovías en la avenida, proporcionando áreas verdes, bienestar y salud a la población, proporcionando un mejor impacto en la calidad de vida (Figura 104).



Figura 104: Mejor calidad de vida en la vía urbana. Fuente: La autora, 2017.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L. V. (2008). *Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas*. Campinas, SP.
- Alves, R. d. (2016). *Meteorologia Aplicada - Notas de aula*. Rio Grande do sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Anandakumar, K. (1999). A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. *Atmospheric Environment* v.33, p.3911-3918.
- Blender, M. (Abril de 2015). *Arquitectura y Energía*. Fonte: <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>
- Bravo, M. F., & Torre, J. M. (2014). Confort Térmico en los espacios públicos urbanos: clima cálido y frío semi seco. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 4, N°. 2, 52-63.
- Bruse, M. (2014). *ENVI-met implementatio of the Jacobs A - gs Model to calculate the stomata conductance*.

- Callejas, I. J., Durante, L. C., & Rosseti, K. d. (2015). Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. *Engineering and Science*, 1:3.
- Canepa, C. (2007). *Cidades Sustentáveis: o município como locus da sustentabilidade*. São Paulo: RCS Editora.
- Castro, H. S., Dias, T. C., & Amanajás, V. V. (2016). As Geotecnologias como ferramenta para o diagnóstico da arborização urbana: o caso de Macapá-Ap. *Raega- O espaço geográfico em análise*, p. 146 - 168.
- Dobbert, L. Y. (2015). *Arborização na cidade de Campinas/SP- percepção e conforto*. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz.
- Energia, C. (2008). *Arborização urbana viária: aspectos de planejamento, implantação e manejo / CPFL*. Campinas, SP: Energia – ed. rev.
- Española, N. T. (1983). *NTP 74: Conforto térmico - Método de Fanger para su evaluación*. Barcelona: Centro de Investigación y Asistencia Técnica - Barcelona.
- Frota, A. B., & Schiffer, S. R. (2003). *Manual do Conforto Térmico*. São Paulo: 8ª Edição, Studio Nobel.
- Gouvêa, M. L. (2007). *Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo*. . São Paulo: Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) -Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.
- Hernández, A. (2013). *Manual del diseño bioclimático urbano: Recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*. Bragança, Portugal: Instituto Politécnico de Bragança.
- Lamberts, R. (2016). *O Conforto e Stress Térmico*. Porto Alegre: Laboratório de Eficiência Energética e Edificações.
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. (2014). *Eficiência Energética na arquitetura*. Rio Grande do Sul: Mondaini.
- Lima, A. M. (1992). *Análise da arborização viária na área central e em seu entorno*. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Tese de doutorado.
- Lima, D. C., Nunes, L. A., & Soares, P. F. (2006). Avaliação da Influência da Vegetação no Conforto em Espaços Livres. *Simpgeu - Simposio de Pós Graduação em Engenharia Urbana*.
- Lucena, A. J. (2013). Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. *Revista Continentes UFRRJ*, n.2, p.28-59, 2013.
- Mascaró, L., & Mascaró, J. (2004). *Ambiência Urbana, 2 edición*. Porto Alegre: +4.

- Medeiros, E., Schreiner, F., Maoski, J., Wludarski, J., Kruger, M., & Eduardo. (2015). *Análise comparativa da temperatura de superfície na pavimentação da praça Garibaldi, Curitiba. Paraná.*
- Merçon, M. G. (2008). *Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo: Análisis térmico de la cubierta ventilada.* Barcelona, España: Master Oficial Arquitectura, Energía y Medio Ambiente de la Universidad Politècnica de Catalunya.
- Minella, F. C. (2014). *Desenho Urbano Climaticamente Orientado: A Influência da Vegetação no Ambiente Térmico Externo.* Paraná: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Moraes, L. d., & Campos, G. d. (2015). *Contribuições da arborização para o conforto ambiental e a eficiência energética urbana.* Santa Maria: Curso de Pós Graduação em Eficiência Energética aplica aos processos produtivos.
- Neto, R. X. (2015). *Temperatura da superfície nos materiais de pavimentação: uma contribuição ao desenvolvimento urbano.* Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
- Nimer, E. (1979). Um modelo metodológico de classificação de climas. *Revista Brasileira de Geografia, Rio de Janeiro*, 59-89.
- Oke, T. R. (1984a). *Methods in urban climatology.*
- Olgyay, V. (2006). *Arquitectura y Clima - Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas.* España, Barcelona: Gustavo Gili.
- Oliveira, A. R. (2008). *Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD.* Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ordóñez, X. C. (2014). *Microclima Y Confort Térmico Urbano: Análisis Sobre La Influencia De La Morfología Del Cañón Urbano Caso De Estudio En Los Barrios El Raval Y Gracia, Barcelona.* Barcelona: Escuela Técnica Superior De Arquitectura De Barcelona.
- PAULA, R. Z. (2004). *A Influência da Vegetação no Conforto Térmico do Ambiente Construído.* Campinas, São paulo: Universidade Estadual de Campinas.
- Pessoa/PB, E. M. (2014). Orlando de C Villar; Virginia M.D de Araújo; Angelina D.L. Costa. *Paranoá.*
- Pezzuto, C. C. (2007). *Avaliação do ambiente térmico nos espaços urbanos abertos. Estudo de caso em Campinas, Sp.* Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Ribeiro, K. F. ( 2016). *Análise da Influência da Vegetação Arbórea no Comportamento Térmico dos Diferentes Tipos de Revestimento de Solo.* Cuiabá, Mato Grosso: Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Física.
- Romero, M. A. (2001). *Arquitetura Bioclimática do Espaço Público.* Brasília: Universidade de Brasília.

- Ruas, Á. C. (2001). *Avaliação de Conforto Térmico: Contribuição à Aplicação Prática das Normas Internacionais*. São Paulo: Ministério do Trabalho e Emprego – Fundacentro.
- Santos, M. (2008). *Da cultura a indústria cultural*. Fonte: Folha Online: [as\\_Culturais/II\\_Seminario\\_Internacional/FCRB\\_Liliana\\_Sousa\\_e\\_Silva\\_Sustentabilidade](#)
- Shinzato, P. (2009). *O impacto da vegetação nos microclimas urbanos*. São Paulo: Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Universidade de São Paulo.
- Silva, C. F., & Romero, M. A. (2010). Desempenho Ambiental de Vias Públicas quanto ao Conforto Térmico Urbano. Estudo de Caso: Tersina – Piauí. *Pluris*.
- Silva, I. M. (2012). *Efeitos do uso e cobertura do solo sobre o conforto higrotérmico*. São Paulo, Piracicaba: Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.
- Silva, M. A. (2001). Meteorologia e Climatologia. *MAPA*.
- Souza, D. M., & Nery, J. T. (2010). Análise da Temperatura, da Umidade e do Conforto Térmico no Município de Ourinhos. *Ix Simposio Brasileiro de Climatologia Geográfica*.
- Stewart, I., & Oke, T. (2012). *Local climate zones for Urban Temperature studies*.
- Tavares, J. P. (2014). Características da Climatologia de Macapá- Ap. *Caminhos da Geografia*.
- TORRE, J. M. (1999). *La Vegetación como Instrumento para el Control Microclimáticos*. Catalunya: Universidad Politecnica de Catalunya.
- WMO. (1998). *Report of the eleventh session of the advisory working group of the Commission for Climatology*,.

# APÉNDICE

## APÉNDICE A – TABLA A1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Maestría en Arquitectura y Sostenibilidad					 Universidad Ricardo Palma Escuela de Posgrado	
Arq. Anneli Maricielo Cardenas Celis - 201513163						
TÍTULO	PROBLEMA PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES		METODOLOGIA
La influencia de la arborización y pavimentación en el confort termico de una via publica de la ciudad de Macapá, 2017.	¿La arborización y pavimentación influyen en el confort térmico urbano en la Avenida Leopoldo Machado, 2017?	Medir la influencia de la arborización y de la pavimentación en el confort térmico urbano en la Avenida Leopoldo Machado, 2017.	La arborización urbana y el material de pavimentación influyen de manera significativa en el confort térmico urbano en la avenida Leopoldo Machado, 2017.	Variable Independiente	A1. Variable independiente: tipo de pavimentación.  B1. Variables independientes: densidad arbórea	<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b> APLICADA  <b>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN:</b> DESCRIPTIVA Y EXPERIMENTAL  <b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:</b> POR OBJETIVOS  <b>POBLACION:</b> - ES CONSTITUIDA POR LAS VARIABLES MICROCLIMÁTICAS EN LA AVENIDA LEOPOLDO MACHADO  <b>MUESTRA:</b> - ES CONSTITUIDA POR LAS VARIABLES MICROCLIMÁTICAS EN TRES PUNTOS DE MEDICIÓN EN LA AVENIDA LEOPOLDO MACHADO.  <b>TECNICAS:</b> LA METODOLOGÍA PROPUESTA PERMITE COMPARACIONES ENTRE LOS DATOS REALES E HIPOTÉTICOS VALIDADOS MEDIANTE MEDICIONES IN LOCO Y USO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL MICRO CLIMÁTICO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.  <b>INSTRUMENTOS:</b> APARATOS METEREOLÓGICOS PORTÁTILES. CAMARA FOTOGRÁFICA. ENVI-met 4.0
	<b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b>	Variable Dependiente	A2. Variable dependiente: temperatura del suelo.  B2. Variables dependientes: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, confort térmico	
	¿El tipo de material utilizado en la pavimentación influye en la temperatura del suelo?	• Comparar la temperatura superficial del suelo para diferentes tipos de materiales usados en la pavimentación;	• El material utilizado en la pavimentación influye en la temperatura del suelo.	Variable Independiente	C1. Variables independientes: densidad arbórea, velocidad del viento a 10 metros de altura, temperatura inicial de la atmosfera, temperatura potencial a 2500 metros, humedad específica en el topo del modelo a 2500 m y humedad relativa a 2m.	
	¿La densidad de arborización urbana influye en la temperatura del aire, humedad relativa del aire y velocidad del aire?	• Comparar la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento en lugares con diferente densidad arbórea.	• La densidad de la arborización influye en la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.	Variable Dependiente	C2. Variables dependientes: índice de confort PMV, índice de disconfort PPD, temperatura del suelo, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire.	
	¿La densidad de arborización urbana influye en los índices de confort térmico (PMV)?	• Comparación del índice PMV en simulaciones numéricas en escenarios hipotéticos con diferente densidad arbórea	• La densidad de la arborización influye en los índices de confort (PMV).			
	• ¿La densidad de arborización urbana influye en los índices de confort térmico (PMV)?	• Comparación del índice PPD en simulaciones numéricas en escenarios hipotéticos con diferente densidad arbórea.	• La densidad de la arborización influye en los índices de disconfort (PPD).			

## APÉNDICE B

INDICE PMV:

**TABLA B1:** Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo SA

<b>Date</b>	<b>Hora</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
20.07.2017	03:00	0,50309	0,5282	0,47653
20.07.2017	04:00	0,48289	0,50901	0,45467
20.07.2017	05:00	0,45458	0,48194	0,42409
20.07.2017	06:00	0,42181	0,45041	0,38858
20.07.2017	07:00	1,2722	0,50339	1,1814
20.07.2017	08:00	3,5578	3,5316	3,5127
20.07.2017	09:00	4,8066	4,7755	4,7946
20.07.2017	10:00	5,3947	5,3522	5,3169
20.07.2017	11:00	5,5635	5,5248	5,4096
20.07.2017	12:00	5,7311	5,7099	5,5428
20.07.2017	13:00	6,2001	6,1626	6,0318
20.07.2017	14:00	6,7286	6,684	6,6391
20.07.2017	15:00	6,9539	6,9	6,8828
20.07.2017	16:00	4,3399	6,6088	6,4974
20.07.2017	17:00	3,4889	3,457	3,4995
20.07.2017	18:00	2,3754	2,3701	2,4322
20.07.2017	19:00	2,0939	2,0936	2,1361
20.07.2017	20:00	1,924	1,9254	1,9563
20.07.2017	21:00	1,7974	1,7998	1,8223
20.07.2017	22:00	1,6952	1,6981	1,7143
20.07.2017	23:00	1,6072	1,6107	1,6217
21.07.2017	00:00	1,5268	1,531	1,5373
21.07.2017	01:00	1,4519	1,4568	1,4588
21.07.2017	02:00	1,3822	1,3879	1,386
21.07.2017	03:00	1,3166	1,3231	1,3174
21.07.2017	04:00	1,2535	1,2609	1,2517
21.07.2017	05:00	1,1918	1,2003	1,1875

*Fuente: La Autora*

**TABLA B2.** Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo AO.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
20.07.2017	03:00	0,50179	0,7197	0,64803
20.07.2017	04:00	0,48197	0,70401	0,63052
20.07.2017	05:00	0,4541	0,68093	0,60459
20.07.2017	06:00	0,4219	0,65392	0,57411
20.07.2017	07:00	1,2656	0,71292	0,8632
20.07.2017	08:00	3,5189	3,5508	3,5517
20.07.2017	09:00	4,7318	4,7471	4,7862
20.07.2017	10:00	5,3522	5,3412	5,3649
20.07.2017	11:00	5,4651	5,1125	5,4799
20.07.2017	12:00	5,5792	5,1156	5,6365
20.07.2017	13:00	6,0575	5,269	6,0618
20.07.2017	14:00	6,5633	4,8997	5,4049
20.07.2017	15:00	6,7824	4,5712	4,8518
20.07.2017	16:00	4,153	4,1358	4,3925
20.07.2017	17:00	3,3295	3,3101	3,343
20.07.2017	18:00	2,2833	2,3417	2,3781
20.07.2017	19:00	2,0164	2,0913	2,1088
20.07.2017	20:00	1,8562	1,9414	1,9479
20.07.2017	21:00	1,7369	1,8292	1,8279
20.07.2017	22:00	1,6399	1,7376	1,7302
20.07.2017	23:00	1,5556	1,658	1,6457
21.07.2017	00:00	1,4789	1,5856	1,5691
21.07.2017	01:00	1,4086	1,5194	1,4991
21.07.2017	02:00	1,3421	1,4569	1,4332
21.07.2017	03:00	1,2783	1,3971	1,3701
21.07.2017	04:00	1,2161	1,3391	1,309
21.07.2017	05:00	1,1547	1,2822	1,2491

*Fuente: La Autora*

**TABLA B3.** Serie de tiempo para los receptores R1, R2 y R3 de los valores PMV en la simulación del modelo CA.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
20.07.2017	03:00	0,63989	0,75789	0,57978
20.07.2017	04:00	0,63251	0,75464	0,56563
20.07.2017	05:00	0,61728	0,7438	0,54283
20.07.2017	06:00	0,59782	0,72889	0,51532
20.07.2017	07:00	0,65639	0,80335	0,5718
20.07.2017	08:00	2,6878	1,8873	1,656
20.07.2017	09:00	3,1938	4,5992	4,6618
20.07.2017	10:00	3,651	5,2526	5,2901
20.07.2017	11:00	4,5749	4,8834	4,8262
20.07.2017	12:00	5,2879	4,7929	4,6525
20.07.2017	13:00	5,6501	4,8836	4,7273
20.07.2017	14:00	6,0695	4,455	4,347
20.07.2017	15:00	6,2523	4,0772	4,0429
20.07.2017	16:00	3,6314	3,6647	3,6722
20.07.2017	17:00	2,8993	2,925	2,973
20.07.2017	18:00	2,0348	2,0765	2,0928
20.07.2017	19:00	1,8145	1,8637	1,8513
20.07.2017	20:00	1,6922	1,7457	1,7179
20.07.2017	21:00	1,6056	1,6624	1,6239
20.07.2017	22:00	1,5366	1,596	1,5489
20.07.2017	23:00	1,4781	1,54	1,4854
21.07.2017	00:00	1,4253	1,4896	1,4278
21.07.2017	01:00	1,3754	1,4422	1,3734
21.07.2017	02:00	1,3278	1,397	1,3213
21.07.2017	03:00	1,2819	1,3537	1,2709
21.07.2017	04:00	1,237	1,3116	1,221
21.07.2017	05:00	1,1923	1,2698	1,1706

*Fuente: La Autora*

**TABLA B4:** Índice de confort PMV en el receptor R1 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA)

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>
20.07.2017	03:00	0,50309	0,50179	0,63989
20.07.2017	04:00	0,48289	0,48197	0,63251
20.07.2017	05:00	0,45458	0,4541	0,61728
20.07.2017	06:00	0,42181	0,4219	0,59782
20.07.2017	07:00	1,2722	1,2656	0,65639
20.07.2017	08:00	3,5578	3,5189	2,6878
20.07.2017	09:00	4,8066	4,7318	3,1938
20.07.2017	10:00	5,3947	5,3522	3,651
20.07.2017	11:00	5,5635	5,4651	4,5749
20.07.2017	12:00	5,7311	5,5792	5,2879
20.07.2017	13:00	6,2001	6,0575	5,6501
20.07.2017	14:00	6,7286	6,5633	6,0695
20.07.2017	15:00	6,9539	6,7824	6,2523
20.07.2017	16:00	4,3399	4,153	3,6314
20.07.2017	17:00	3,4889	3,3295	2,8993
20.07.2017	18:00	2,3754	2,2833	2,0348
20.07.2017	19:00	2,0939	2,0164	1,8145
20.07.2017	20:00	1,924	1,8562	1,6922
20.07.2017	21:00	1,7974	1,7369	1,6056
20.07.2017	22:00	1,6952	1,6399	1,5366
20.07.2017	23:00	1,6072	1,5556	1,4781
21.07.2017	00:00	1,5268	1,4789	1,4253
21.07.2017	01:00	1,4519	1,4086	1,3754
21.07.2017	02:00	1,3822	1,3421	1,3278
21.07.2017	03:00	1,3166	1,2783	1,2819
21.07.2017	04:00	1,2535	1,2161	1,237
21.07.2017	05:00	1,1918	1,1547	1,1923

*Fuente: La Autora*

**TABLA B5:** Índice de confort PMV en el receptor R2 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA)

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>AS</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>
20.07.2017	03:00	0,5282	0,7197	0,75789
20.07.2017	04:00	0,50901	0,70401	0,75464
20.07.2017	05:00	0,48194	0,68093	0,7438
20.07.2017	06:00	0,45041	0,65392	0,72889
20.07.2017	07:00	0,50339	0,71292	0,80335
20.07.2017	08:00	3,5316	3,5508	1,8873
20.07.2017	09:00	4,7755	4,7471	4,5992
20.07.2017	10:00	5,3522	5,3412	5,2526
20.07.2017	11:00	5,5248	5,1125	4,8834
20.07.2017	12:00	5,7099	5,1156	4,7929
20.07.2017	13:00	6,1626	5,269	4,8836
20.07.2017	14:00	6,684	4,8997	4,455
20.07.2017	15:00	6,9	4,5712	4,0772
20.07.2017	16:00	6,6088	4,1358	3,6647
20.07.2017	17:00	3,457	3,3101	2,925
20.07.2017	18:00	2,3701	2,3417	2,0765
20.07.2017	19:00	2,0936	2,0913	1,8637
20.07.2017	20:00	1,9254	1,9414	1,7457
20.07.2017	21:00	1,7998	1,8292	1,6624
20.07.2017	22:00	1,6981	1,7376	1,596
20.07.2017	23:00	1,6107	1,658	1,54
21.07.2017	00:00	1,531	1,5856	1,4896
21.07.2017	01:00	1,4568	1,5194	1,4422
21.07.2017	02:00	1,3879	1,4569	1,397
21.07.2017	03:00	1,3231	1,3971	1,3537
21.07.2017	04:00	1,2609	1,3391	1,3116
21.07.2017	05:00	1,2003	1,2822	1,2698

*Fuente: La Autora*

**TABLA B6:** Índice de confort PMV en el receptor R3 para los modelos: sin arborización (SA), arborización original (AO) y con arborización (CA)

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>
20.07.2017	03:00	0,47653	0,64803	0,57978
20.07.2017	04:00	0,45467	0,63052	0,56563
20.07.2017	05:00	0,42409	0,60459	0,54283
20.07.2017	06:00	0,38858	0,57411	0,51532
20.07.2017	07:00	1,1814	0,8632	0,5718
20.07.2017	08:00	3,5127	3,5517	1,656
20.07.2017	09:00	4,7946	4,7862	4,6618
20.07.2017	10:00	5,3169	5,3649	5,2901
20.07.2017	11:00	5,4096	5,4799	4,8262
20.07.2017	12:00	5,5428	5,6365	4,6525
20.07.2017	13:00	6,0318	6,0618	4,7273
20.07.2017	14:00	6,6391	5,4049	4,347
20.07.2017	15:00	6,8828	4,8518	4,0429
20.07.2017	16:00	6,4974	4,3925	3,6722
20.07.2017	17:00	3,4995	3,343	2,973
20.07.2017	18:00	2,4322	2,3781	2,0928
20.07.2017	19:00	2,1361	2,1088	1,8513
20.07.2017	20:00	1,9563	1,9479	1,7179
20.07.2017	21:00	1,8223	1,8279	1,6239
20.07.2017	22:00	1,7143	1,7302	1,5489
20.07.2017	23:00	1,6217	1,6457	1,4854
21.07.2017	00:00	1,5373	1,5691	1,4278
21.07.2017	01:00	1,4588	1,4991	1,3734
21.07.2017	02:00	1,386	1,4332	1,3213
21.07.2017	03:00	1,3174	1,3701	1,2709
21.07.2017	04:00	1,2517	1,309	1,221
21.07.2017	05:00	1,1875	1,2491	1,1706

*Fuente: La Autora*

## APÉNDICE C

ÍNDICE PPD:

**TABLA B1:** Valores del índice de discomfort PPD en el receptor R1 para los modelos SA, AO y CA

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>
20.07.2017	03:00	10,29	10,263	13,596
20.07.2017	04:00	9,8709	9,8523	13,397
20.07.2017	05:00	9,3127	9,3036	12,994
20.07.2017	06:00	8,7096	8,7112	12,493
20.07.2017	07:00	38,847	38,513	14,05
20.07.2017	08:00	99,972	99,963	96,58
20.07.2017	09:00	100	100	99,686
20.07.2017	10:00	100	100	99,987
20.07.2017	11:00	100	100	100
20.07.2017	12:00	100	100	100
20.07.2017	13:00	100	100	100
20.07.2017	14:00	100	100	100
20.07.2017	15:00	100	100	100
20.07.2017	16:00	100	100	99,984
20.07.2017	17:00	99,953	99,862	98,576
20.07.2017	18:00	90,448	87,739	78,308
20.07.2017	19:00	80,817	77,496	67,768
20.07.2017	20:00	73,217	69,886	61,331
20.07.2017	21:00	66,888	63,72	56,651
20.07.2017	22:00	61,492	58,51	52,891
20.07.2017	23:00	56,739	53,926	49,713
21.07.2017	00:00	52,36	49,753	46,865
21.07.2017	01:00	48,298	45,972	44,207
21.07.2017	02:00	44,568	42,455	41,707
21.07.2017	03:00	41,123	39,156	39,343
21.07.2017	04:00	37,899	36,036	37,073
21.07.2017	05:00	34,849	33,064	34,87

*Fuente: La Autora*

**TABLA C2:** Valores PPD (%) en el receptor R1 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA-CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>
20.07.2017	03:00	-3,306	0,027	-3,333
20.07.2017	04:00	-3,5261	0,0186	-3,5447
20.07.2017	05:00	-3,6813	0,0091	-3,6904
20.07.2017	06:00	-3,7834	-0,0016	-3,7818
20.07.2017	07:00	24,797	0,334	24,463
20.07.2017	08:00	3,392	0,009	3,383
20.07.2017	09:00	0,314	0	0,314
20.07.2017	10:00	0,013	0	0,013
20.07.2017	11:00	0	0	0
20.07.2017	12:00	0	0	0
20.07.2017	13:00	0	0	0
20.07.2017	14:00	0	0	0
20.07.2017	15:00	0	0	0
20.07.2017	16:00	0,016	0	0,016
20.07.2017	17:00	1,377	0,091	1,286
20.07.2017	18:00	12,14	2,709	9,431
20.07.2017	19:00	13,049	3,321	9,728
20.07.2017	20:00	11,886	3,331	8,555
20.07.2017	21:00	10,237	3,168	7,069
20.07.2017	22:00	8,601	2,982	5,619
20.07.2017	23:00	7,026	2,813	4,213
21.07.2017	00:00	5,495	2,607	2,888
21.07.2017	01:00	4,091	2,326	1,765
21.07.2017	02:00	2,861	2,113	0,748
21.07.2017	03:00	1,78	1,967	-0,187
21.07.2017	04:00	0,826	1,863	-1,037
21.07.2017	05:00	-0,021	1,785	-1,806

*Fuente: La Autora*

**TABLA C3:** Valores PPD (%) en el receptor R2 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.

<b>Date</b>	<b>Time</b>	<b>SA-CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>
20.07.2017	03:00	-6,263	-5,063	-1,2
20.07.2017	04:00	-6,577	-5,008	-1,569
20.07.2017	05:00	-6,7973	-4,8943	-1,903
20.07.2017	06:00	-6,9487	-4,7477	-2,201
20.07.2017	07:00	-8,31	-5,396	-2,914
20.07.2017	08:00	28,537	-0,005	28,542
20.07.2017	09:00	0	0	0
20.07.2017	10:00	0	0	0
20.07.2017	11:00	0	0	0
20.07.2017	12:00	0	0	0
20.07.2017	13:00	0	0	0
20.07.2017	14:00	0	0	0
20.07.2017	15:00	0	0	0
20.07.2017	16:00	0,012	0	0,012
20.07.2017	17:00	1,207	0,098	1,109
20.07.2017	18:00	10,207	0,796	9,411
20.07.2017	19:00	10,547	0,091	10,456
20.07.2017	20:00	9,1	-0,763	9,863
20.07.2017	21:00	7,279	-1,51	8,789
20.07.2017	22:00	5,521	-2,103	7,624
20.07.2017	23:00	3,853	-2,563	6,416
21.07.2017	00:00	2,251	-2,976	5,227
21.07.2017	01:00	0,788	-3,396	4,184
21.07.2017	02:00	-0,486	-3,7	3,214
21.07.2017	03:00	-1,603	-3,897	2,294
21.07.2017	04:00	-2,591	-4,023	1,432
21.07.2017	05:00	-3,468	-4,098	0,63

*Fuente: La Autora*

**TABLA C4:** Valores PPD (%) en el receptor R3 entre las diferencias SA y CA, SA y AO, AO y CA.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA-CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>
20.07.2017	03:00	-1,753	-3,528	1,775
20.07.2017	04:00	-1,8301	-3,4731	1,643
20.07.2017	05:00	-1,8543	-3,3523	1,498
20.07.2017	06:00	-1,8434	-3,1954	1,352
20.07.2017	07:00	26,998	18,12	8,878
20.07.2017	08:00	40,587	0,001	40,586
20.07.2017	09:00	0	0	0
20.07.2017	10:00	0	0	0
20.07.2017	11:00	0	0	0
20.07.2017	12:00	0	0	0
20.07.2017	13:00	0	0	0
20.07.2017	14:00	0	0	0
20.07.2017	15:00	0	0	0
20.07.2017	16:00	0,011	0	0,011
20.07.2017	17:00	0,961	0,079	0,882
20.07.2017	18:00	9,674	-0,072	9,746
20.07.2017	19:00	11,177	-0,608	11,785
20.07.2017	20:00	10,509	-1,139	11,648
20.07.2017	21:00	9,243	-1,563	10,806
20.07.2017	22:00	7,929	-1,871	9,8
20.07.2017	23:00	6,633	-2,09	8,723
21.07.2017	00:00	5,359	-2,301	7,66
21.07.2017	01:00	4,198	-2,552	6,75
21.07.2017	02:00	3,199	-2,719	5,918
21.07.2017	03:00	2,34	-2,802	5,142
21.07.2017	04:00	1,619	-2,834	4,453
21.07.2017	05:00	1,025	-2,834	3,859

*Fuente: La Autora*

## APÉNDICE D

TEMPERATURA DEL SUELO:

**TABLA D1:** Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R1

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	23,395	23,566	22,818	-0,171	0,748	0,577
20.07.2017	04:00	23,694	23,865	23,198	-0,171	0,667	0,496
20.07.2017	05:00	23,876	24,043	23,47	-0,167	0,573	0,406
20.07.2017	06:00	23,977	24,143	23,669	-0,166	0,474	0,308
20.07.2017	07:00	24,055	24,219	23,842	-0,164	0,377	0,213
20.07.2017	08:00	29,783	29,79	25,225	-0,007	4,565	4,558
20.07.2017	09:00	37,015	36,87	30,933	0,145	5,937	6,082
20.07.2017	10:00	43,339	43,191	31,211	0,148	11,98	12,128
20.07.2017	11:00	47,932	47,714	33,554	0,218	14,16	14,378
20.07.2017	12:00	51,129	50,839	47,501	0,29	3,338	3,628
20.07.2017	13:00	52,949	52,614	51,457	0,335	1,157	1,492
20.07.2017	14:00	53,454	53,053	52,479	0,401	0,574	0,975
20.07.2017	15:00	52,404	51,953	51,493	0,451	0,46	0,911
20.07.2017	16:00	43,025	42,534	41,636	0,491	0,898	1,389
20.07.2017	17:00	40,163	39,664	38,687	0,499	0,977	1,476
20.07.2017	18:00	37,046	36,642	35,986	0,404	0,656	1,06
20.07.2017	19:00	35,047	34,72	34,23	0,327	0,49	0,817
20.07.2017	20:00	33,801	33,519	33,114	0,282	0,405	0,687
20.07.2017	21:00	32,91	32,66	32,324	0,25	0,336	0,586
20.07.2017	22:00	32,236	32,011	31,731	0,225	0,28	0,505
20.07.2017	23:00	31,703	31,498	31,268	0,205	0,23	0,435
21.07.2017	00:00	31,262	31,072	30,888	0,19	0,184	0,374
21.07.2017	01:00	30,884	30,711	30,567	0,173	0,144	0,317
21.07.2017	02:00	30,552	30,394	30,286	0,158	0,108	0,266
21.07.2017	03:00	30,251	30,105	30,034	0,146	0,071	0,217
21.07.2017	04:00	29,979	29,842	29,813	0,137	0,029	0,166
21.07.2017	05:00	29,721	29,587	29,6	0,134	-0,013	0,121

*Fuente: La Autora*

**TABLA D2:** Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R2

Date	hora	SA	AO	CA	SA-AO	AO-CA	SA-CA
20.07.2017	03:00	23,062	23,015	22,825	0,047	0,19	0,237
20.07.2017	04:00	23,369	23,395	23,234	-0,026	0,161	0,135
20.07.2017	05:00	23,563	23,658	23,534	-0,095	0,124	0,029
20.07.2017	06:00	23,676	23,842	23,759	-0,166	0,083	-0,083
20.07.2017	07:00	23,768	23,998	23,96	-0,23	0,038	-0,192
20.07.2017	08:00	27,178	27,509	25,39	-0,331	2,119	1,788
20.07.2017	09:00	36,74	37,328	31,392	-0,588	5,936	5,348
20.07.2017	10:00	43,353	44,203	43	-0,85	1,203	0,353
20.07.2017	11:00	48,123	49,067	48,61	-0,944	0,457	-0,487
20.07.2017	12:00	51,413	41,792	41,265	9,621	0,527	10,148
20.07.2017	13:00	53,254	41,129	40,527	12,125	0,602	12,727
20.07.2017	14:00	53,718	39,582	38,766	14,136	0,816	14,952
20.07.2017	15:00	52,586	38,669	37,599	13,917	1,07	14,987
20.07.2017	16:00	49,77	38,157	36,952	11,613	1,205	12,818
20.07.2017	17:00	41,48	37,068	35,899	4,412	1,169	5,581
20.07.2017	18:00	37,839	35,049	34,12	2,79	0,929	3,719
20.07.2017	19:00	35,629	33,71	32,924	1,919	0,786	2,705
20.07.2017	20:00	34,249	32,855	32,161	1,394	0,694	2,088
20.07.2017	21:00	33,269	32,227	31,609	1,042	0,618	1,66
20.07.2017	22:00	32,531	31,738	31,181	0,793	0,557	1,35
20.07.2017	23:00	31,951	31,342	30,839	0,609	0,503	1,112
21.07.2017	00:00	31,471	31,007	30,552	0,464	0,455	0,919
21.07.2017	01:00	31,06	30,719	30,299	0,341	0,42	0,761
21.07.2017	02:00	30,703	30,456	30,082	0,247	0,374	0,621
21.07.2017	03:00	30,383	30,23	29,874	0,153	0,356	0,509
21.07.2017	04:00	30,088	30,01	29,699	0,078	0,311	0,389
21.07.2017	05:00	29,82	29,797	29,526	0,023	0,271	0,294

*Fuente: La Autora*

**TABLA D3:** Serie temporal de la temperatura del suelo en el receptor R3

Date	Hora	AS	AO	CA	SA-AO	AO-CA	SA-CA
20.07.2017	03:00	24,174	23,869	24,059	0,305	-0,19	0,115
20.07.2017	04:00	24,453	24,263	24,423	0,19	-0,16	0,03
20.07.2017	05:00	24,607	24,518	24,651	0,089	-0,133	-0,044
20.07.2017	06:00	24,682	24,681	24,791	0,001	-0,11	-0,109
20.07.2017	07:00	24,741	24,817	24,909	-0,076	-0,092	-0,168
20.07.2017	08:00	29,9	27,053	26,349	2,847	0,704	3,551
20.07.2017	09:00	36,571	36,784	31,931	-0,213	4,853	4,64
20.07.2017	10:00	42,43	43,554	42,147	-1,124	1,407	0,283
20.07.2017	11:00	46,746	48,308	47,161	-1,562	1,147	-0,415
20.07.2017	12:00	49,769	51,569	40,119	-1,8	11,45	9,65
20.07.2017	13:00	51,474	53,375	39,488	-1,901	13,887	11,986
20.07.2017	14:00	51,885	49,748	37,91	2,137	11,838	13,975
20.07.2017	15:00	50,79	44,068	36,941	6,722	7,127	13,849
20.07.2017	16:00	48,115	43,023	36,392	5,092	6,631	11,723
20.07.2017	17:00	40,321	39,209	35,387	1,112	3,822	4,934
20.07.2017	18:00	36,932	36,55	33,56	0,382	2,99	3,372
20.07.2017	19:00	34,908	34,855	32,367	0,053	2,488	2,541
20.07.2017	20:00	33,664	33,775	31,628	-0,111	2,147	2,036
20.07.2017	21:00	32,79	32,993	31,102	-0,203	1,891	1,688
20.07.2017	22:00	32,139	32,397	30,699	-0,258	1,698	1,44
20.07.2017	23:00	31,629	31,925	30,377	-0,296	1,548	1,252
21.07.2017	00:00	31,207	31,533	30,107	-0,326	1,426	1,1
21.07.2017	01:00	30,848	31,198	29,875	-0,35	1,323	0,973
21.07.2017	02:00	30,533	30,902	29,662	-0,369	1,24	0,871
21.07.2017	03:00	30,25	30,638	29,473	-0,388	1,165	0,777
21.07.2017	04:00	29,99	30,386	29,299	-0,396	1,087	0,691
21.07.2017	05:00	29,744	30,162	29,124	-0,418	1,038	0,62

*Fuente: La Autora*

## APÉNDICE E

HUMEDAD RELATIVA:

**Tabla E1:** Serie de tiempo de la humedad relativa (%) en el receptor R1

Date	Hora	SA	AO	CA	SA-CA
20.07.2017	03:00	95,014	95,099	96,453	-1,439
20.07.2017	04:00	94,567	94,657	96,021	-1,454
20.07.2017	05:00	94,31	94,4	95,745	-1,435
20.07.2017	06:00	94,163	94,248	95,559	-1,396
20.07.2017	07:00	93,898	93,982	95,288	-1,39
20.07.2017	08:00	89,709	90,039	92,809	-3,1
20.07.2017	09:00	87,176	87,461	89,822	-2,646
20.07.2017	10:00	83,25	84,387	88,431	-5,181
20.07.2017	11:00	78,384	79,561	84,231	-5,847
20.07.2017	12:00	73,789	74,971	79,677	-5,888
20.07.2017	13:00	69,037	70,224	75,091	-6,054
20.07.2017	14:00	64,364	65,618	70,869	-6,505
20.07.2017	15:00	60,623	61,901	67,346	-6,723
20.07.2017	16:00	58,819	60,138	65,715	-6,896
20.07.2017	17:00	59,84	61,191	66,992	-7,152
20.07.2017	18:00	64,868	66,159	71,866	-6,998
20.07.2017	19:00	66,713	68,01	73,723	-7,01
20.07.2017	20:00	67,215	68,552	74,362	-7,147
20.07.2017	21:00	67,036	68,387	74,578	-7,542
20.07.2017	22:00	66,456	67,804	74,614	-8,158
20.07.2017	23:00	65,676	67,009	74,53	-8,854
21.07.2017	00:00	64,835	66,13	74,364	-9,529
21.07.2017	01:00	63,986	65,216	74,132	-10,146
21.07.2017	02:00	63,142	64,322	73,848	-10,706
21.07.2017	03:00	62,333	63,482	73,561	-11,228
21.07.2017	04:00	61,576	62,723	73,36	-11,784
21.07.2017	05:00	60,919	62,124	73,28	-12,361

*Fuente: La Autora*

**TABLA E2:** Serie de tiempo de la humedad relativa (%) en el receptor R2

Date	Hora	SA	AO	CA	SA-CA
20.07.2017	03:00	94,811	94,992	96,16	-1,349
20.07.2017	04:00	94,346	94,551	95,706	-1,36
20.07.2017	05:00	94,075	94,291	95,412	-1,337
20.07.2017	06:00	93,918	94,135	95,211	-1,293
20.07.2017	07:00	93,656	93,886	94,951	-1,295
20.07.2017	08:00	89,729	90,529	92,755	-3,026
20.07.2017	09:00	86,891	87,686	89,731	-2,84
20.07.2017	10:00	82,898	84,453	88,05	-5,152
20.07.2017	11:00	78,022	79,611	83,923	-5,901
20.07.2017	12:00	73,48	75,157	79,723	-6,243
20.07.2017	13:00	68,854	70,509	75,344	-6,49
20.07.2017	14:00	64,32	66,152	71,372	-7,052
20.07.2017	15:00	60,777	62,52	67,886	-7,109
20.07.2017	16:00	58,753	60,506	65,99	-7,237
20.07.2017	17:00	59,758	61,492	67,208	-7,45
20.07.2017	18:00	64,57	66,07	71,72	-7,15
20.07.2017	19:00	66,383	67,908	73,542	-7,159
20.07.2017	20:00	66,876	68,448	74,166	-7,29
20.07.2017	21:00	66,693	68,283	74,374	-7,681
20.07.2017	22:00	66,107	67,7	74,403	-8,296
20.07.2017	23:00	65,321	66,901	74,31	-8,989
21.07.2017	00:00	64,474	66,018	74,133	-9,659
21.07.2017	01:00	63,615	65,098	73,89	-10,275
21.07.2017	02:00	62,763	64,197	73,594	-10,831
21.07.2017	03:00	61,945	63,351	73,294	-11,349
21.07.2017	04:00	61,179	62,584	73,079	-11,9
21.07.2017	05:00	60,513	61,977	72,984	-12,471

*Fuente: La Autora*

**TABLA E3:** Serie de tiempo de la humedad relativa (%) en el receptor R3

<b>Date</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	95,051	95,726	96,156	-1,105
20.07.2017	04:00	94,567	95,256	95,672	-1,105
20.07.2017	05:00	94,281	94,966	95,362	-1,081
20.07.2017	06:00	94,111	94,783	95,155	-1,044
20.07.2017	07:00	93,839	94,53	94,879	-1,04
20.07.2017	08:00	89,658	91,432	92,235	-2,577
20.07.2017	09:00	86,631	87,904	88,544	-1,913
20.07.2017	10:00	82,566	84,277	86,859	-4,293
20.07.2017	11:00	77,736	79,384	82,577	-4,841
20.07.2017	12:00	73,152	74,926	78,626	-5,474
20.07.2017	13:00	68,539	70,334	74,376	-5,837
20.07.2017	14:00	64,032	66,123	70,518	-6,486
20.07.2017	15:00	60,539	62,608	67,187	-6,648
20.07.2017	16:00	58,5	60,589	65,435	-6,935
20.07.2017	17:00	59,486	61,612	66,636	-7,15
20.07.2017	18:00	64,548	66,134	71,422	-6,874
20.07.2017	19:00	66,523	68,219	73,306	-6,783
20.07.2017	20:00	67,118	68,913	73,972	-6,854
20.07.2017	21:00	67,009	68,864	74,207	-7,198
20.07.2017	22:00	66,48	68,369	74,256	-7,776
20.07.2017	23:00	65,739	67,64	74,18	-8,441
21.07.2017	00:00	64,927	66,811	74,017	-9,09
21.07.2017	01:00	64,098	65,937	73,788	-9,69
21.07.2017	02:00	63,269	65,073	73,504	-10,235
21.07.2017	03:00	62,471	64,256	73,215	-10,744
21.07.2017	04:00	61,721	63,512	73,011	-11,29
21.07.2017	05:00	61,068	62,922	72,927	-11,859

*Fuente: La Autora*

## APÉNDICE F

VELOCIDAD DEL VIENTO:

**TABLA F1:** Serie de tiempo de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R1

Día	Hora	SA	AO	CA	SA-CA
20.07.2017	03:00	0,91814	0,94969	0,44716	0,47098
20.07.2017	04:00	0,89743	0,92781	0,42662	0,47081
20.07.2017	05:00	0,87865	0,90772	0,40824	0,47041
20.07.2017	06:00	0,86135	0,88902	0,39162	0,46973
20.07.2017	07:00	0,84516	0,87135	0,37635	0,46881
20.07.2017	08:00	0,81834	0,84418	0,35374	0,4646
20.07.2017	09:00	0,74655	0,76999	0,30183	0,44472
20.07.2017	10:00	0,78098	0,78988	0,30032	0,48066
20.07.2017	11:00	0,77502	0,78724	0,31716	0,45786
20.07.2017	12:00	0,75625	0,77209	0,31704	0,43921
20.07.2017	13:00	0,73853	0,75346	0,31489	0,42364
20.07.2017	14:00	0,72308	0,7343	0,3115	0,41158
20.07.2017	15:00	0,70718	0,71516	0,30918	0,398
20.07.2017	16:00	0,69407	0,70059	0,3053	0,38877
20.07.2017	17:00	0,69487	0,69954	0,30666	0,38821
20.07.2017	18:00	0,71619	0,71875	0,32564	0,39055
20.07.2017	19:00	0,73347	0,73255	0,336	0,39747
20.07.2017	20:00	0,74373	0,74077	0,33882	0,40491
20.07.2017	21:00	0,75009	0,746	0,33777	0,41232
20.07.2017	22:00	0,7543	0,7494	0,3344	0,4199
20.07.2017	23:00	0,7569	0,75139	0,32997	0,42693
21.07.2017	00:00	0,75836	0,75242	0,3253	0,43306
21.07.2017	01:00	0,75912	0,75274	0,32089	0,43823
21.07.2017	02:00	0,75954	0,7528	0,3165	0,44304
21.07.2017	03:00	0,7595	0,75239	0,31168	0,44782
21.07.2017	04:00	0,75926	0,75122	0,30531	0,45395
21.07.2017	05:00	0,75779	0,74781	0,29741	0,46038

*Fuente: La Autora*

**TABLA F2:** Serie de tiempo de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R2

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	0,80975	0,51836	0,3199	0,29139	0,19846	0,48985
20.07.2017	04:00	0,78926	0,49783	0,29915	0,29143	0,19868	0,49011
20.07.2017	05:00	0,77045	0,47931	0,2805	0,29114	0,19881	0,48995
20.07.2017	06:00	0,75304	0,46248	0,26366	0,29056	0,19882	0,48938
20.07.2017	07:00	0,73678	0,44704	0,24831	0,28974	0,19873	0,48847
20.07.2017	08:00	0,71361	0,42568	0,22882	0,28793	0,19686	0,48479
20.07.2017	09:00	0,65716	0,3737	0,19267	0,28346	0,18103	0,46449
20.07.2017	10:00	0,67645	0,39824	0,19091	0,27821	0,20733	0,48554
20.07.2017	11:00	0,67293	0,40575	0,20704	0,26718	0,19871	0,46589
20.07.2017	12:00	0,66243	0,40726	0,2137	0,25517	0,19356	0,44873
20.07.2017	13:00	0,65378	0,40767	0,22047	0,24611	0,1872	0,43331
20.07.2017	14:00	0,64737	0,40851	0,22667	0,23886	0,18184	0,4207
20.07.2017	15:00	0,64087	0,40922	0,23331	0,23165	0,17591	0,40756
20.07.2017	16:00	0,63571	0,41116	0,2372	0,22455	0,17396	0,39851
20.07.2017	17:00	0,63801	0,41755	0,24039	0,22046	0,17716	0,39762
20.07.2017	18:00	0,65151	0,43213	0,25172	0,21938	0,18041	0,39979
20.07.2017	19:00	0,66159	0,44062	0,25632	0,22097	0,1843	0,40527
20.07.2017	20:00	0,66685	0,44432	0,25543	0,22253	0,18889	0,41142
20.07.2017	21:00	0,66945	0,44548	0,25169	0,22397	0,19379	0,41776
20.07.2017	22:00	0,6706	0,4451	0,24629	0,2255	0,19881	0,42431
20.07.2017	23:00	0,67064	0,44357	0,24019	0,22707	0,20338	0,43045
21.07.2017	00:00	0,66989	0,44133	0,234	0,22856	0,20733	0,43589
21.07.2017	01:00	0,66866	0,43858	0,22811	0,23008	0,21047	0,44055
21.07.2017	02:00	0,66719	0,43571	0,22236	0,23148	0,21335	0,44483
21.07.2017	03:00	0,6654	0,43258	0,21645	0,23282	0,21613	0,44895
21.07.2017	04:00	0,66348	0,429	0,20961	0,23448	0,21939	0,45387
21.07.2017	05:00	0,66072	0,42395	0,20189	0,23677	0,22206	0,45883

*Fuente: La Autora*

**TABLA F3:** Serie de tiempo de la velocidad del viento (m/s) en el receptor R3

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	1,2513	0,74102	0,85502	0,51028	-0,114	0,39628
20.07.2017	04:00	1,237	0,72697	0,84157	0,51003	-0,1146	0,39543
20.07.2017	05:00	1,2236	0,71424	0,82905	0,50936	-0,11481	0,39455
20.07.2017	06:00	1,211	0,70258	0,81733	0,50842	-0,11475	0,39367
20.07.2017	07:00	1,1988	0,69173	0,80623	0,50707	-0,1145	0,39257
20.07.2017	08:00	1,1807	0,67616	0,79052	0,50454	-0,11436	0,39018
20.07.2017	09:00	1,1317	0,63412	0,75318	0,49758	-0,11906	0,37852
20.07.2017	10:00	1,1351	0,63965	0,73461	0,49545	-0,09496	0,40049
20.07.2017	11:00	1,1248	0,63788	0,73333	0,48692	-0,09545	0,39147
20.07.2017	12:00	1,1085	0,63132	0,72441	0,47718	-0,09309	0,38409
20.07.2017	13:00	1,0931	0,62428	0,71401	0,46882	-0,08973	0,37909
20.07.2017	14:00	1,0793	0,61788	0,70343	0,46142	-0,08555	0,37587
20.07.2017	15:00	1,066	0,61215	0,69446	0,45385	-0,08231	0,37154
20.07.2017	16:00	1,0548	0,60834	0,68614	0,44646	-0,0778	0,36866
20.07.2017	17:00	1,0516	0,60943	0,68395	0,44217	-0,07452	0,36765
20.07.2017	18:00	1,0599	0,6186	0,69485	0,4413	-0,07625	0,36505
20.07.2017	19:00	1,0664	0,6235	0,69984	0,4429	-0,07634	0,36656
20.07.2017	20:00	1,0692	0,62486	0,69997	0,44434	-0,07511	0,36923
20.07.2017	21:00	1,07	0,62449	0,69758	0,44551	-0,07309	0,37242
20.07.2017	22:00	1,0697	0,62316	0,69372	0,44654	-0,07056	0,37598
20.07.2017	23:00	1,0686	0,62116	0,68917	0,44744	-0,06801	0,37943
21.07.2017	00:00	1,067	0,61875	0,68446	0,44825	-0,06571	0,38254
21.07.2017	01:00	1,0651	0,61609	0,6799	0,44901	-0,06381	0,3852
21.07.2017	02:00	1,063	0,61343	0,67539	0,44957	-0,06196	0,38761
21.07.2017	03:00	1,0608	0,61067	0,67071	0,45013	-0,06004	0,39009
21.07.2017	04:00	1,0585	0,60765	0,66525	0,45085	-0,0576	0,39325
21.07.2017	05:00	1,0556	0,60364	0,65902	0,45196	-0,05538	0,39658

Fuente: La Autora

## APÉNDICE G

TEMPERATURA DEL AIRE:

**TABLA G1:** Series temporales de la temperatura en el receptor R1

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	27,076	27,032	26,553	0,044	0,479	0,523
20.07.2017	04:00	26,976	26,932	26,471	0,044	0,461	0,505
20.07.2017	05:00	26,848	26,805	26,363	0,043	0,442	0,485
20.07.2017	06:00	26,707	26,665	26,241	0,042	0,424	0,466
20.07.2017	07:00	26,62	26,582	26,188	0,038	0,394	0,432
20.07.2017	08:00	28,739	28,698	28,43	0,041	0,268	0,309
20.07.2017	09:00	31,232	31,13	30,841	0,102	0,289	0,391
20.07.2017	10:00	32,753	32,765	32,738	-0,012	0,027	0,015
20.07.2017	11:00	33,662	33,537	33,272	0,125	0,265	0,39
20.07.2017	12:00	34,577	34,365	33,941	0,212	0,424	0,636
20.07.2017	13:00	35,401	35,167	34,549	0,234	0,618	0,852
20.07.2017	14:00	36,081	35,806	34,987	0,275	0,819	1,094
20.07.2017	15:00	36,494	36,188	35,197	0,306	0,991	1,297
20.07.2017	16:00	36,393	36,044	34,974	0,349	1,07	1,419
20.07.2017	17:00	35,53	35,164	34,043	0,366	1,121	1,487
20.07.2017	18:00	33,619	33,266	32,121	0,353	1,145	1,498
20.07.2017	19:00	32,734	32,413	31,283	0,321	1,13	1,451
20.07.2017	20:00	32,218	31,919	30,841	0,299	1,078	1,377
20.07.2017	21:00	31,849	31,57	30,538	0,279	1,032	1,311
20.07.2017	22:00	31,563	31,296	30,299	0,267	0,997	1,264
20.07.2017	23:00	31,321	31,064	30,097	0,257	0,967	1,224
21.07.2017	00:00	31,099	30,853	29,913	0,246	0,94	1,186
21.07.2017	01:00	30,89	30,66	29,738	0,23	0,922	1,152
21.07.2017	02:00	30,694	30,474	29,569	0,22	0,905	1,125
21.07.2017	03:00	30,506	30,291	29,404	0,215	0,887	1,102
21.07.2017	04:00	30,323	30,108	29,234	0,215	0,874	1,089
21.07.2017	05:00	30,137	29,919	29,055	0,218	0,864	1,082

*Fuente: La Autora*

**TABLA G2:** Series temporales de la temperatura en el receptor R2

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	27,143	27,047	26,618	0,096	0,429	0,525
20.07.2017	04:00	27,044	26,948	26,543	0,096	0,405	0,501
20.07.2017	05:00	26,918	26,823	26,44	0,095	0,383	0,478
20.07.2017	06:00	26,778	26,685	26,322	0,093	0,363	0,456
20.07.2017	07:00	26,687	26,6	26,267	0,087	0,333	0,42
20.07.2017	08:00	28,671	28,601	28,403	0,07	0,198	0,268
20.07.2017	09:00	31,171	31,045	30,784	0,126	0,261	0,387
20.07.2017	10:00	32,665	32,646	32,663	0,019	-0,017	0,002
20.07.2017	11:00	33,584	33,422	33,186	0,162	0,236	0,398
20.07.2017	12:00	34,504	34,227	33,792	0,277	0,435	0,712
20.07.2017	13:00	35,324	35,025	34,376	0,299	0,649	0,948
20.07.2017	14:00	36	35,621	34,778	0,379	0,843	1,222
20.07.2017	15:00	36,385	36,001	35,006	0,384	0,995	1,379
20.07.2017	16:00	36,376	35,958	34,889	0,418	1,069	1,487
20.07.2017	17:00	35,531	35,108	34,002	0,423	1,106	1,529
20.07.2017	18:00	33,687	33,284	32,148	0,403	1,136	1,539
20.07.2017	19:00	32,81	32,433	31,32	0,377	1,113	1,49
20.07.2017	20:00	32,294	31,94	30,881	0,354	1,059	1,413
20.07.2017	21:00	31,926	31,59	30,58	0,336	1,01	1,346
20.07.2017	22:00	31,64	31,316	30,343	0,324	0,973	1,297
20.07.2017	23:00	31,4	31,084	30,142	0,316	0,942	1,258
21.07.2017	00:00	31,18	30,873	29,961	0,307	0,912	1,219
21.07.2017	01:00	30,973	30,681	29,787	0,292	0,894	1,186
21.07.2017	02:00	30,779	30,496	29,621	0,283	0,875	1,158
21.07.2017	03:00	30,594	30,315	29,458	0,279	0,857	1,136
21.07.2017	04:00	30,412	30,133	29,291	0,279	0,842	1,121
21.07.2017	05:00	30,229	29,946	29,115	0,283	0,831	1,114

*Fuente: La Autora*

**TABLA G3:** Series temporales de la temperatura en el receptor R3

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>SA</b>	<b>AO</b>	<b>CA</b>	<b>SA-AO</b>	<b>AO-CA</b>	<b>SA-CA</b>
20.07.2017	03:00	27,079	26,854	26,676	0,225	0,178	0,403
20.07.2017	04:00	26,986	26,769	26,601	0,217	0,168	0,385
20.07.2017	05:00	26,864	26,654	26,497	0,21	0,157	0,367
20.07.2017	06:00	26,728	26,524	26,378	0,204	0,146	0,35
20.07.2017	07:00	26,642	26,454	26,324	0,188	0,13	0,318
20.07.2017	08:00	28,736	28,562	28,494	0,174	0,068	0,242
20.07.2017	09:00	31,241	31,138	31,03	0,103	0,108	0,211
20.07.2017	10:00	32,674	32,692	32,822	-0,018	-0,13	-0,148
20.07.2017	11:00	33,582	33,471	33,371	0,111	0,1	0,211
20.07.2017	12:00	34,515	34,28	33,933	0,235	0,347	0,582
20.07.2017	13:00	35,345	35,077	34,508	0,268	0,569	0,837
20.07.2017	14:00	36,033	35,649	34,905	0,384	0,744	1,128
20.07.2017	15:00	36,423	36,014	35,116	0,409	0,898	1,307
20.07.2017	16:00	36,436	35,997	34,977	0,439	1,02	1,459
20.07.2017	17:00	35,607	35,149	34,123	0,458	1,026	1,484
20.07.2017	18:00	33,7	33,288	32,22	0,412	1,068	1,48
20.07.2017	19:00	32,783	32,377	31,377	0,406	1	1,406
20.07.2017	20:00	32,244	31,848	30,929	0,396	0,919	1,315
20.07.2017	21:00	31,86	31,471	30,623	0,389	0,848	1,237
20.07.2017	22:00	31,562	31,177	30,382	0,385	0,795	1,18
20.07.2017	23:00	31,311	30,929	30,178	0,382	0,751	1,133
21.07.2017	00:00	31,083	30,705	29,994	0,378	0,711	1,089
21.07.2017	01:00	30,869	30,501	29,818	0,368	0,683	1,051
21.07.2017	02:00	30,669	30,307	29,65	0,362	0,657	1,019
21.07.2017	03:00	30,479	30,118	29,485	0,361	0,633	0,994
21.07.2017	04:00	30,294	29,93	29,316	0,364	0,614	0,978
21.07.2017	05:00	30,107	29,738	29,138	0,369	0,6	0,969

*Fuente: La Autora*