



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



**FACULTAD DEL HÁBITAT
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

TEMA:

**RESPUESTA TÉRMICA AMBIENTAL Y SUPERFICIAL ENTRE UNA
AZOTEA VERDE Y OTRA DE TIPO CONVENCIONAL**



Tesis para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL HÁBITAT
Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento:
Administración de la Construcción y Gerencia de Proyectos

Presenta

EAO. SALVADOR CHÁVEZ DELGADO



ASESOR

DR. CARLOS RENATO RAMOS PALACIOS

SINODALES

DR. GERARDO JAVIER ARISTA GONZÁLEZ

DR. MARCOS ALGARA SILLER

San Luis Potosí, S.L.P., enero de 2018



**PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS SE CONTÓ
CON EL APOYO CONACYT No. 594855**

Acto que dedico:

A Dios: Por mantener mi espíritu de lucha.

A mi esposa: Por su infinita paciencia, amor y apoyo incondicional, sobre todo por ser parte de este maravilloso proyecto de vida. Te amo

A la memoria de mis padres, quienes me enseñaron con su ejemplo a amar a Dios, a respetar y amar la vida, vivirla con alegría y sabiduría, sin ello no hubiese sido posible la terminación de este proyecto.

A mis hermanos: Por la confianza en mis incursiones, sepan que han sido mi ejemplo y motivación para seguir haciendo camino.

A mis sobrinos (as) y cuñadas (o): Por sus insistentes palabras de ánimo.

¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores:

Dr. Carlos Renato Ramos Palacios por su valiosa dirección y apoyo en la terminación de esta tesis, por haberme dedicado tiempo, paciencia, comprensión y total disposición, además de haberme soportado todos estos años. A mi Comité Tutelar, los Sinodales; Dr. Gerardo Javier Arista González por su apoyo, guía y consejos y al Dr. Marcos Algara Siller, por su atención y apoyo para disponer del Unitechivo Vivo.

Dr. Jorge Aguillón Robles por su asesoramiento en el manejo de instrumentos de medición térmica y facilitar su empleo.

Al Departamento de Diseño y Construcción de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por las atenciones que me brindaron como el facilitarme la información requerida.

A todos los maestros y profesores del Departamento de Investigación y Posgrado de la Facultad del Hábitat que directa e indirectamente hicieron posible la culminación de mis estudios de posgrado, por el aporte de sus conocimientos, experiencia y sabiduría, dedicación y esfuerzo, apoyo y amistad que incondicionalmente me brindaron, les expreso mi mayor reconocimiento y sincera gratitud.

A mis compañeros de generación y amigos: Tita, Dani, Liz, Eli, Zury, Rubí y Mau.

Por esos momentos de alegría, tristeza y preocupaciones.

Gracias por permitir compartir mi vida con las suyas.

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPITULO 1	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	4
1.4 OBJETIVO	5
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES	5
1.6 OBJETO DE ESTUDIO	5
1.7 HIPÓTESIS	5
1.8 DELIMITACIÓN DEL TEMA	6
1.9 JUSTIFICACIÓN	6
1.10 TIPO DE ESTUDIO	6
1.11 ALCANCES	7
CAPITULO 2	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1 CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LAS CIUDADES	9
2.1.1 Antecedentes del crecimiento urbano	9
2.1.2 La extensión territorial urbana	11
2.1.3 Consecuencias ambientales del desarrollo urbano.....	13
2.2 URBANISMO Y CONDICIONES CLIMÁTICAS	14
2.2.1 El clima y el calentamiento de las ciudades	14
2.2.2 El microclima en respuesta del entorno urbano	15
2.2.3 Efecto térmico de superficies cementadas/pavimentadas en el sistema urbano ..	17
2.3 EL PAPEL DE LAS SUPERFICIES Y MATERIALES URBANOS	19
2.3.1 Intercambio radiativo y calorífico de los materiales constructivos.....	19
2.3.2 Condiciones térmicas de superficies cementadas y superficies vegetadas	21
2.4 PARTICIPACIÓN DE LOS TECHOS VERDES EN EL MICROCLIMA	23
2.4.1 Tipos de techos verdes y áreas vegetadas	23
2.4.2 Proporción y densidad de especies vegetales.....	25
2.4.3 Efecto de la azotea verde en el confort térmico y la habitabilidad.....	26

CAPÍTULO 3	30
METODO	30
3.1 DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	30
3.1.1 Ubicación geográfica y entorno climático de la ciudad de San Luis Potosí.....	30
3.2 Sitio de estudio	31
3.3 Unidades de estudio	31
3.3.1 UniTecho Verde (UTV)	32
3.3.2 Azotea sin superficie naturada (HAB).....	33
3.4 Estrategia metodológica general	34
3.5 Mediciones de temperaturas ambiente y superficial	34
3.5.1 Manejo de los datos de temperatura ambiental y superficial	37
3.6 Evaluación de las áreas de azoteas de los edificios del Campus Universitario	37
3.7 Cálculo del margen de error en las áreas de azoteas	38
3.8 Cálculo de la proporción del calentamiento superficial en función del área	38
CAPITULO 4	41
RESULTADOS	41
4.1 Temperatura (del aire) ambiente (TA)	41
4.2 Humedad relativa (HR)	43
4.3 Temperatura superficial (TS)	44
4.5 Imágenes termográficas de Invierno	50
4.6 Proporción de calentamiento superficial en función del área, PCS (A)	52
4.7 Extrapolación de PCS (A) en función de azoteas de edificios del Campus Pte.	55
CAPITULO 5	58
DISCUSIÓN	58
5.1 Temperatura ambiente y temperatura superficial.	58
5.2 Proporción de calentamiento superficial en función del área.	60
CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	63
ANEXOS	75
Anexo 1. Planta de Conjunto de Ciudad Universitaria, Campus Poniente, UASLP.....	75
Anexo 2. Planta Arquitectónica de Ciudad Universitaria, Campus Poniente, UASLP	76

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Estrategia metodologica general para llevar a cabo la investigación.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Temperatura Ambiente promedio (°C).....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3. Temperatura Superficial.....</i>	<i>47</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización del sitio y Unidades de estudio: A) Mapa de la Ciudad de San Luis Potosí, SLP. México. B). Sitio de estudio: Ciudad Universitaria Campus Poniente, UASLP. C) Unidades de estudio: Unitecho Vivo (UTV), del edificio “B” de la Facultad de Ingeniera. D) Azotea del Edificio del Instituto de Investigación y Posgrado de la facultad del Hábitat.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2. Vista del Unitecho Vivo (UTV) del edificio B de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. Vista en sentido lateral de la losa en el edificio de posgrado de la Facultad del Hábitat (HAB) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4. Instalación de los HOBOS para la medición de la temperatura ambiental (TA) en los dos sitios de estudio. En el círculo en rojo se indica el lugar de colocación del sensor HOBOS en HAB y en el UTV (debajo de una jardinera) y UTV (al lado de una viga).</i>	<i>35</i>
<i>Figura 5. Medición de la temperatura superficial (TS) en los dos sitios de estudio, por medio de un procesador de imágenes termográficas. En el cuadro de color amarillo se indican las tomas de las imágenes termográficas en el HAB, en el UTV (en hortalizas) y UTV.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 6. Promedio de la temperatura ambiente (TA) monitoreada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La variación de los datos se distribuye en horas diurnas durante la época de verano (A) e invierno (B).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 7. Promedio de la humedad relativa (HR) monitoreada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La variación de los datos se distribuye en horas diurnas durante el verano (A) e invierno (B).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8. Variación de la temperatura superficial promedio (TS) evaluada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La respuesta se distribuye de las 06:00 hasta las 18:00 h en intervalos de dos horas en verano (A) e invierno (B).</i>	<i>46</i>
<i>Figura 9. Imágenes termográficas con las TS máximas y mínimas en los horarios establecidos (6:00, 14:00 y 18:00 hrs.) del periodo de verano en UTV y HAB.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 10. Imágenes termográficas con las temperaturas máximas y mínimas en los horarios establecidos (6:00, 14:00 y 18:00 hrs.) del periodo de invierno en UTV y HAB. En la sección correspondiente a UTV, se presentan las termografías tomadas a las 7:00 hrs.</i>	<i>51</i>

Figura. 11. Proporción de calentamiento superficial en función del área (PCS (A) durante el horario evaluado en verano (a) e invierno (b) en el Unitecho vivo (UTV) y el Hábitat (HAB).....53

Figura 12. Comparación de la proporción de calentamiento superficial en función del área (PCS (A)) entre las áreas de azoteas del Unitecho vivo (UTV) y el Hábitat (HAB), de acuerdo con la ecuación de la recta, en verano e invierno54

Figura. 13. Extrapolación de PCS (A) en el áreas de azoteas del Campús Poniente de la UASLP a partir del Unitecho Vivo (UTV) y el Posgrado del Hábitat (HAB) en verano e invierno.....56

RESUMEN

Una causa del aumento de calor urbano es la relación de la radiación solar con las superficies construidas donde sus materiales absorben y emiten energía calorífica hacia el ambiente, por lo que la construcción de techos verdes o naturación vegetal puede ser una estrategia de mitigación, considerando que los espacios verdes suelen estar limitados. En el presente trabajo se evaluó la temperatura ambiental y superficial de una azotea verde y una sin cobertura vegetal o convencional. Este estudio se realizó durante las horas de mayor radiación solar, evaluando el calentamiento del área de azotea, en la época de verano e invierno. Para ello se emplearon instrumentos termosensibles del aire (Pro v2, ONSET HOBO Data Loggers, U.S.A. 2009-2011) y una cámara termográfica (Modelo Ti10, FLUKE Corporation, U.S.A., 2007-2010) para realizar las mediciones superficiales. Los resultados obtenidos permitieron conocer las condiciones térmicas de las superficies. La temperatura y humedad relativa del aire fueron más baja y alta en la azotea verde que en la convencional, respectivamente, durante la época de verano. Por otro lado, una de las diferencias más importantes en la temperatura superficial promedio entre ambos sitios ocurrió en la época de verano. Así mismo, se detectó en las imágenes termográficas mayor porción del infrarrojo numerosas zonas en color rojo sobre la superficie de la azotea convencional. También, se observó incremento en el calentamiento superficial mientras mayor fue el área de la superficie, donde la azotea con cubierta vegetal pareció mitigar las condiciones térmicas, bien sea entre sitios como en la extrapolación hacia las demás edificaciones de ciudad universitaria. Finalmente, la disminución del calentamiento en las azoteas podría ser mayor al colocarse sistemas de naturación vegetal sobre las superficies de dichas edificaciones.

Palabras clave:

Calor urbano, techo verde, naturación vegetal, mitigación del calentamiento

CAPITULO 1

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Las actividades y acciones generadas por el hombre en los centros urbanos, trae consigo importantes variaciones que alteran el medio ambiente urbano. La proliferación de gases tóxicos industriales, el inevitable tránsito vehicular que genera altos niveles de contaminación, la contaminación visual y auditiva, son tan solo algunas consecuencias que degradan la calidad de vida de sus habitantes. Es evidente que para adquirir el derecho a un ambiente sano y equilibrado se requiere de acciones y políticas ambientales (Peña, 2003). En este sentido, los problemas ambientales que se viven hoy en día en las ciudades, se deben al crecimiento poblacional, y tienen un efecto a escala local, regional y global. De acuerdo a INEGI (2010) el crecimiento poblacional urbano en México en el año 2010, fue del 77.8 % con respecto al año 2000 que fue del 74.6 % (72 722 625 habitantes) lo que representa un incremento poblacional del 3.2 % (2 487 124 habitantes) es decir 80 209 749 habitantes. Esto representa un crecimiento desmedido de las ciudades y por consiguiente una mayor demanda de vivienda, y de todo tipo de servicios urbanos. Así mismo, indica una eminente contaminación ambiental y un incremento de temperatura ya que los materiales de construcción de las diferentes edificaciones, almacenan el calor por la radiación solar que inciden en ellos y lo emiten a la atmósfera, más aún cuando estos son impermeables y de colores oscuros (Higueras, 2006, López, 1991). Condición que da origen al efecto de isla de calor urbana. Este hecho conduce a Identificar las temperaturas ambientales por consecuencia de la radiación emitida por los elementos constructivos (techos, pavimentos y fachadas) al medio ambiente, Identificando las temperaturas ambientales y superficiales de una azotea verde (Unitecho-Vivo), de otra sin cobertura vegetal, teniendo en cuenta el comportamiento de las plantas bajo los efectos radiativos de dichos elementos constructivos que calientan el aire, y evaluar las diferencias de temperaturas entre sí.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano, el incremento poblacional, la demanda de equipamiento e infraestructura urbana, provocan que las superficies de una ciudad favorezcan el aumento de la temperatura del aire (Ignatius et al., 2015). Esta situación trasciende por el constante uso de materiales impermeables y reflectivos aplicados en la construcción de las edificaciones. La incidencia de los rayos solares sobre la superficie de estos materiales, emiten el calor hacia la atmosfera urbana. Cada día es mayor el interés por la construcción masiva de espacios, lo que aminora la importancia de los espacios verdes con beneficios ambientales. Esta situación da origen al efecto de isla de calor urbana sobretodo en ciudades de clima árido y semiárido, tal es el caso de la ciudad de San Luis Potosí, específicamente la zona universitaria poniente de la UASLP, cuyas características forman similitud a un contexto urbano ya que se genera de igual manera altas temperaturas por la radiación solar recibida por los elementos constructivos que conforman al campus universitario. Para este caso de estudio la implementación de techos verdes o naturación vegetal, podría ser una estrategia de mitigación ante los efectos generados por los materiales constructivos que irradian calor hacia el ambiente, particularmente en climas áridos y semiáridos.

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Qué respuesta térmica puede tener la superficie de una azotea verde con respecto a una de tipo convencional sin naturación?

¿De qué manera influye el área de una azotea verde y otra no naturada en el calentamiento ambiental y superficial en las edificaciones de la zona universitaria poniente de la UASLP.?

¿Cuántos metros cuadrados de azoteas naturadas se requieren para aminorar las altas temperaturas que se generan por la incidencia radiativa de las edificaciones de la zona universitaria poniente de la UASLP.?

1.4 OBJETIVO

Evaluar la respuesta térmica ambiental y superficial de un techo sin cobertura vegetal y otro con sistema de naturación, así como la posible proyección de sus efectos microclimáticos.

1.5 OBJETIVOS PARTICULARES

1. Identificar la temperatura ambiente y superficial entre una azotea verde y una azotea no naturada en temporada cálida y fría de la ciudad de San Luis Potosí.
2. Proyectar las condiciones térmicas de las azoteas de dichos edificios en un escenario sin naturación y uno con techos verdes.

1.6 OBJETO DE ESTUDIO

- ❖ La variación térmica ambiental y superficial que resultan del medio construido y un área de azotea verde.

1.7 HIPÓTESIS

Si bien los materiales de construcción absorben, almacenan y emiten grandes cantidades de energía calorífica al ambiente, entonces mediante la implementación de los sistemas de naturación en una azotea se pueden aminorar los efectos de isla de calor en las condiciones microclimáticas del entorno. De acuerdo con lo anterior, dicho tratamiento se puede implementar en azoteas de diferentes edificaciones de la Zona Universitaria, campus poniente.

1.8 DELIMITACIÓN DEL TEMA

Este trabajo se limitó a evaluar las condiciones térmicas que una azotea verde y otra sin cubierta vegetal pueden detectarse y determinar sus posibles efectos microclimáticos. Tales medidas se evaluaron en condiciones diurnas y en dos periodos del año: verano e invierno.

1.9 JUSTIFICACIÓN

El empleo de materiales impermeables y reflectivos de las edificaciones, así mismo, las condiciones ambientales que se encuentran gobernadas por el medio construido pueden producir efectos climáticos locales. Es por ello que a partir de estudios climáticos, pueden ayudar a entender mejor los efectos térmicos de elementos estructurales de concreto como de aquellos que cuentan con una cobertura vegetal y mejorar algunos problemas relacionados con el confort térmico al interior de las edificaciones como de la calidad de su habitabilidad. Los techos verdes pueden mejorar la humedad del ambiente y, la disminución del efecto de Isla de calor.

1.10 TIPO DE ESTUDIO

Debido a que el presente estudio consistió en determinar variables de tipo microclimático y abordar aspectos técnicos, el desarrollo de la investigación se estableció con base en el método científico. De este modo, la investigación desarrollada fue de tipo experimental debido a la variación a lo largo de un día durante dos temporadas del año contrastantes. Además, esta investigación es de tipo cuantitativa por los valores numéricos obtenidos en las mediciones realizadas. De acuerdo con el planteamiento del presente estudio, los cambios térmicos de los materiales y del ambiente, así como la variación de las condiciones del clima estacional definen el carácter científico del mismo. La naturaleza de este tipo de investigación se basa en dos principios de la investigación científica: la observación y la experimentación. Así mismo, se realizó una comparación de los datos obtenidos de

acuerdo con el diseño experimental y, se sometieron a un análisis estadístico.

1.11 ALCANCES

Evaluar el efecto microclimático de las superficies de azoteas impermeabilizadas versus otra que cuenta con cubierta vegetal. Por medio de un análisis cuantitativo ayudará a conocer los efectos de emisión de la reflexión solar, versus los de la mitigación del calor y el mejoramiento térmico del aire local urbano. También, este planteamiento de estrategias puede generar información sobre las condiciones ambientales debido al calentamiento de cubiertas con acabados convencionales y la cubierta vegetal con un sistema naturado.

CAPITULO 2

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LAS CIUDADES

2.1.1 Antecedentes del crecimiento urbano

A partir de la Revolución industrial, las ciudades comenzaron a presentar grandes transformaciones y crecimiento, como resultado de la industrialización y el desarrollo de tecnologías, enfocadas al uso de nuevas fuentes energéticas como es el carbón (Sandino y Montiel, 2012). Esto produjo cambios importantes en las condiciones de vida de las ciudades. Por ello, la población urbana comenzó a adquirir una serie de bienes y servicios, logrando aumentar el nivel y la calidad de vida de las personas. Dicho fenómeno, fue uno de los principales factores que causó el incremento demográfico y la explotación de los recursos naturales con fines de uso industrial (Mumford, 1956). El aumento de estas actividades marcó una importante etapa de la historia de las ciudades, debido a las oportunidades de crecimiento económico que conllevó la era industrial. Esto abrió paso al crecimiento de las ciudades en cuanto a su población, su extensión territorial, pero también de los efectos negativos del clima local como la contaminación (Grimm et al., 2008) la degradación y la ocupación del suelo para nuevos asentamientos.

Tras la Revolución industrial, a finales del siglo XVIII y principios del XIX, en el Reino Unido, otros países europeos y posteriormente en Norteamérica, continuó la tendencia de mayor desarrollo de las ciudades. Estas comenzaron a presentar mayor dominio territorial y la generación de bienes y servicios, generando un rápido crecimiento poblacional (Hartwell, S.F) como consecuencia de la creciente migración de personas, desde el campo a la ciudad (Sandino y Montiel, 2012). Por lo general, la búsqueda de mejores condiciones de vida fue el principio de buscar emplearse en la industria, especialmente en sistemas productivos como la manufactura de artículos básicos elaborados en talleres artesanales (Brom, 2001). Este hecho fomentó la consolidación de una economía urbana con un alto proceso de industrialización con sistemas de producción mecanizados (Chaves, 2004). Durante esta

época, el trabajo manual fue sustituido por el uso de máquinas, que al permitir una producción más rápida y eficiente, dio inicio a la transformación tecnológica que dio paso a la revolución científica (Hobsbawm, 1997). Al mismo tiempo, la técnica y mecanización de los procesos industriales, junto con el desarrollo científico contribuyeron con el crecimiento poblacional en las ciudades y cambios importantes, desde el punto de vista social y cultural.

Las ciudades industriales del siglo XIX se consolidaron como ciudades densas y compactas, donde las actividades productivas, los sistemas de transporte, y los diferentes estratos sociales que formaron su población se agrupaban en inmediata proximidad, demarcadas por fronteras precisas y formas definidas, y diferenciadas del entorno rural, siendo el tamaño máximo de la mancha urbana no mayor a unos tres kilómetros de diámetro (López, 1993). A finales del siglo XIX, innovaciones tecnológicas, tales como el descubrimiento y uso de la energía eléctrica en 1879, y el motor de explosión en 1910, jugaron un papel determinante en la movilización de las mercancías y de los trabajadores al interior de las ciudades, estableciéndose las condiciones para la expansión y desarrollo de las modernas ciudades industriales del siglo XIX (López, 1993).

Peter Hall (1975) considera que entre 1870 y 1914, las grandes ciudades inglesas, sufren una transformación importante con el desarrollo y eficiencia de los sistemas de transporte público conformado por tranvías y autobuses, luego eléctricos y, posteriormente de motor de explosión, gracias a ello se logra un sistema de servicio de transporte más rápido y eficaz, originándose los primeros asentamientos urbanos periféricos. A mediados del siglo XX, y hasta la Segunda Guerra Mundial, se presenta una etapa de transición entre las primeras ciudades industriales y la aparición de áreas metropolitanas o ciudades difusas. Como resultado, en 1900, principia el transporte intra-urbano (primero de tipo colectivo y después privado), originándose los sistemas públicos de transporte eléctrico como tranvías, metropolitanos y ferrocarriles de cercanías. Cincuenta años más tarde, aparecen los automóviles de combustión interna, acercando a la gente a sus lugares de residencia y centros de trabajo, de tal modo que se consolidan los primeros suburbios residenciales (Oyon, 1992). De esta manera, la substitución del carbón por energía eléctrica en varios mecanismos de maquinarias y también la utilización de derivados del petróleo

para los motores de combustión fueron las principales fuentes de energía que influyeron en la industrialización de las ciudades. En respuesta a este auge de las actividades industriales en las ciudades la calidad del ambiente comienza a disminuir. Uno de estos efectos ha sido la pérdida de condiciones en el aire urbano o contaminación del ambiente aéreo.

A pesar de los efectos negativos del aire en las ciudades, la población humana sigue concentrándose en estos espacios. Por lo tanto, los sistemas urbanos representan áreas geográficas que producen grandes transformaciones ambientales como la falta de calidad del aire, y los cambios de uso de suelo continuos, entre otros (de la Fuente y Suárez, 2008). Los indicadores actuales sobre el urbanismo en la escala global, muestran que más del 50% de la población habita en centros urbanos, y esta cifra podrá llegar a 84% en el 2030 (ONU, 2004). Por todo lo anterior, los sistemas urbanos representan áreas de importancia en cuanto al desarrollo económico en cualquier tipo de escala, desde la local hasta la global. Sin embargo, su expansión continua altera significativamente los ecosistemas de los que también dependen (Carabias, 1988).

2.1.2 La extensión territorial urbana

El crecimiento de las periferias urbanas y el aumento en los desarrollos urbanos por lo general, las ciudades se caracterizan por los espacios con una alta densidad de edificaciones y vialidades, (Bazant, 2010) lo que demanda nuevos servicios como, redes de agua potable, drenaje, energía eléctrica entre otros, (Aguilar, 2002). Los sistemas urbanos están delimitados por una periferia y al expandirse de forma radial aumentan su área territorial. En estas áreas se han establecido diferentes componentes urbanos, desde pequeñas edificaciones en los bordes de la ciudad hasta desarrollos urbanos de alto nivel socioeconómico o asentamientos humanos irregulares y/o ilegales (Santillán, 2013), donde además de las actividades y funciones que desempeñan estos asentamientos humanos, los bienes y servicios se intensifican (SEDESOL, CONAPO, 2012). Este proceso continuo de expansión urbana es la principal causa de cambio de uso del suelo que afecta zonas rurales o naturales y ocasionan gran alteración ambiental (Villanueva et al., 2012). También, al aumentar la extensión territorial del sistema urbano se incrementan los índices de

población. Se estima que alrededor de 3 billones de personas viven en asentamientos urbanos en ciudades en desarrollo al rededor del mundo, esto representa casi el 50 % de la población en dicha escala. Por lo general, las ciudades presentan un alto desarrollo económico que pueden influir a distintas regiones y localidades (Cohen, 2006), además de un mayor crecimiento demográfico. Los indicadores globales de la población humana señalan que las ciudades de ciertas regiones continuarán en crecimiento. Entre las ciudades que concentran mayor densidad poblacional destacan las asiáticas (reunen 53% de la población urbana global) y en segundo lugar las de Latinoamérica (13%) (United Nations, 2014). El crecimiento de las ciudades latinoamericanas se debe principalmente a la migración interna, las personas de campo hacia la ciudad, intensificando el factor demográfico y acelerando el crecimiento urbano (Cunha, J y Rodríguez, V, J. 2009). De esta manera, el aumento poblacional es un factor que generalmente indica o se asocia con el crecimiento de las ciudades. Por ejemplo, en 1950 la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (AMM) tenían una población de 1,392,623, 1,746,777 y 740,191, mientras que en estas mismas ciudades, en el 2010 la población alcanzó 15,175,862, 7,350,682 y 4,653 458 millones, respectivamente (INEGI, 1950-2010). Según la CONAPO, la zona Metropolitana de la Ciudad de México albergará una población de 21 millones de habitantes en 2020, lo que probablemente, genere mayor demanda de recursos como la electricidad, agua potable y drenaje, entre otros (Suárez y Delgado, 2006). Este mismo autor, indica que la alta demanda de recursos en la Ciudad de México, probablemente, genere efectos negativos en el ambiente. Este tipo de ejemplos en México y otras regiones del planeta muestran los mismos indicadores debido al fenómeno de la urbanización.

Comúnmente, tanto el crecimiento poblacional como territorial de las ciudades son causa del alto deterioro ambiental que suele presentarse en las periferias. La zona metropolitana de San Luis Potosí se encuentra en una posición geográfica susceptible de crecimiento urbano e industrial, debido al fomento de nuevas fuentes de trabajo tanto para la población local como para la foránea (Amuzurrutia, et al., 2015). Los desarrollos urbanos, los fraccionamientos y las zonas comerciales e industriales, en San Luis Potosí, han intensificado el crecimiento poblacional, que se está acentuando en las periferias de la

ciudad, lo que genera problemas de movilidad y saturación de servicios, y por tanto una afectación a la calidad de vida de los ciudadanos. Además de dicha situación, el aumento de la superficie e infraestructura urbana, conlleva alteraciones ambientales importantes como la contaminación del aire, de los ríos, degradación del suelo por el cambio de uso de suelo, de agrícola a urbano, actividades agrícolas inadecuadas que provocan la erosión del suelo, el sobrepastoreo entre otros (Jiménez, et al., 2005).

2.1.3 Consecuencias ambientales del desarrollo urbano

El desarrollo urbano, a traído consigo grandes consecuencias ambientales en todas las escalas, resultado de inadecuadas políticas y gestiones administrativas sobre la regulación del uso del suelo que han derivado la informalidad e ilegalidad del mismo, sobre todo en países latinoamericanos (Garza, 2009). Por otra parte, el alto índice poblacional, el consumo percapita y la alta actividad productiva por unidad de superficie, entre otros cambios, han contribuido de manera global a la generación e incremento de problemas ambientales, tal y como los puntualiza de la Fuente y Suárez. (2008), la alteración de los ciclos biogeoquímicos, pérdida de la biodiversidad global en todos los niveles, el desequilibrio de los ecosistemas y, el mal uso de la tierra o suelo. El cambio de uso de suelo provoca que día a día, se pierdan grandes extensiones de tierras agrícolas con un alto rendimiento productivo, con ello se logra intensificar la expansión urbana (Seto et al., 2011). Se ha observado que entre más se extienden las ciudades más se incrementan los efectos negativos del clima urbano (Grimm et al., 2008). Los efectos de la urbanización sobre el medio ambiente son negativos, y es un factor determinante para la salud física y mental de los habitantes citadinos siendo estos más susceptibles a la tensión ambiental (Güneralp y Seto, 2008) y a factores de demanda de servicios urbanos.

2.2 URBANISMO Y CONDICIONES CLIMÁTICAS

2.2.1 El clima y el calentamiento de las ciudades

La urbanización es un fenómeno mundial, que implica la expansión física de una ciudad o zona metropolitana y el crecimiento en proporción de su población (OCDE, 2006; UN, 2008). Por esto, la urbanización puede considerarse la forma más radical de transformación del paisaje natural por el hombre (Fernández, 2009) y, como las principales consumidoras de recursos naturales y energía. Las ciudades utilizan más de dos tercios de la demanda de energía del mundo (IEA, 2008a), la cual se utiliza para el suministro de electricidad, sistemas de calefacción y transporte. La tendencia creciente de la urbanización, y el consecuente aumento de la demanda global de energía, especialmente en los sectores de transporte y construcción, así como la cantidad de energía consumida en la industria y en las actividades domésticas y agrícolas como de irrigación, fertilizantes, pesticidas y labranza (Foley et al., 2014) son los promotores principales de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de bióxido de carbono (OECD, 2009; Saynes et al., 2016; Carbonell et al., 2005).

Las ciudades son generadoras del 60 al 80% de las emisiones de gases a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y cambio climático. Este fenómeno contribuye a la emisión directa de GEI en las ciudades y fuera de estas, al causar efectos en la química atmosférica y la radiación por parte de las diferentes superficies del territorio (IEA, 2008). Estos compuestos son en su mayoría de origen fósil como el carbón, el petróleo y el gas natural, siendo los principales GEI de origen antropogénico, el bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), cloroflorocarburos (CFCs), y vapor de agua (H₂O) (Mendoza et al., 2005). El incremento de la emisión de estos y otros gases de efecto invernadero están modificando sus concentraciones en la atmósfera; y los cambios de uso del suelo, los cuales han modificado los balances de radiación entre la superficie y la atmósfera, que han provocado efectos importantes sobre el clima (Fernández, 2009). Tales alteraciones pueden conducir a diferentes estrategias de

adaptación, que dependerá de sus interacciones, de la ubicación como de su tamaño, de sus gobiernos locales, de sus características socioeconómicas (Masson et al., 2014), además de las zonas climáticas donde se ubiquen estas ciudades, entre otros factores.

El clima de una ciudad puede afectarse por el fenómeno llamado isla de calor, el cual indica el aumento de temperatura en el centro de esta, en contraste con las zonas rurales aledañas (Fernández, 2009). Algunos de los efectos más importantes de este fenómeno son el incremento en la temperatura y la concentración de ciertos contaminantes en el aire, además de la consecuente utilización de sistemas de enfriamiento en las edificaciones que también liberan el calor a la atmósfera (Okwen et al., 2011). Así mismo, la ICU puede cambiar los ciclos atmosféricos locales, la proporción de radiación solar y la composición química de las masas de aire (Hallegatte et al., 2008).

Por lo antes mencionado, se debe poner atención en los indicadores que muestran alteraciones ambientales en los sistemas urbanos. Estos indicadores ambientales están relacionados con el uso de energéticos, las actividades humanas y los sistemas constructivos. Sobre este último aspecto, el incremento de los desarrollos urbanos, continuamente, crean espacios y condiciones que contribuyen a los cambios en el clima de la ciudad y en áreas de menor escala. Por lo general, los espacios abiertos de una ciudad y el conjunto de edificaciones se siguen diseñando y creando con un enfoque no sustentable. Esto significa que los espacios no cuentan con las medidas ambientales necesarias como una proporción suficiente de áreas verdes, prácticas de construcción no contaminantes y el uso de materiales menos tóxicos al medio. En este sentido, los urbanizadores, arquitectos, ingenieros y responsables de las políticas urbanas tienen la responsabilidad de diseñar y construir mediante un uso y aprovechamiento energético más eficiente y racional (Barboza, 2013); en donde se promueva el uso de energías renovables.

2.2.2 El microclima en respuesta del entorno urbano

El microclima de las ciudades se caracteriza por la fluctuación de variables atmosféricas en espacios limitados por el entorno urbano y su contexto. La temperatura, la altitud, latitud,

topografía, la humedad relativa, el viento, la vegetación como de la luz que reciben del sol, son otras variables fundamentales del microclima (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003). Este conjunto de variables y su fluctuación se ha estudiado por igual en espacios naturales como urbanos.

El proceso de urbanización y las actividades antropogénicas han generado microclimas artificiales en las zonas urbanas (microclima urbano), lo que ha dado lugar a diferencias en los climas de las diversas ciudades, y los climas rurales (López, 1991). La composición y naturaleza de las actividades en una ciudad como sus materiales determinan las condiciones de su microclima. De esta manera, la alta concentración de tales superficies y actividades suelen causar un fenómeno común en todas las ciudades: la isla de calor urbana, en la que el sistema urbano presenta altas temperaturas hacia el centro y disminuye progresivamente hacia las zonas rurales. Este fenómeno puede establecer de manera importante el clima urbano, y se distinguen dos tipos: la isla de calor atmosférica, lo cual representa la diferencia en las temperaturas del aire entre la zona urbana y rural; y la isla de calor superficial, que constituye la diferencia entre las temperaturas de los materiales urbanos (pavimento, aceras, techos de edificios, entre otros) y el aire situado encima de ellos (Voogt y Oke, 2003).

El fenómeno de isla de calor urbano se presenta debido a los efectos combinados de la interferencia estructural de los edificios y materiales de construcción, con la radiación térmica, el bajo albedo de las superficies impermeables, la disminución de agua en la atmósfera (evapotranspiración) y el calentamiento antropogénico de fuentes móviles y fijas (OCDE, 2008). Este fenómeno es responsable de que las zonas urbanas se calienten de 3.5 a 4.5 °C más que las zonas rurales que las rodean; llegando a presentarse diferencias de hasta 10 °C entre estas zonas, debido a la absorción de radiación solar y re-irradian calor. Por lo general, esta variación aumenta o disminuye según las horas de exposición a la energía radiante.

Otro aspecto sobre el calentamiento del aire en las ciudades es el de la proporción de albedo de las superficies. De acuerdo a (Bouyer et al., 2009), el albedo es la relación de la energía solar reflejada con la energía solar incidente. El color de las superficies puede ser

causa de la absorción o reflexión de la energía radiante, por ejemplo, las superficies claras o brillantes tienen valores de albedo superiores a las oscuras u opacas. Por lo general, los albedos urbanos están en el rango de 0.1 a 0.2, pero en algunas ciudades estos valores pueden ser excedidos (Taha, 1997). El uso de materiales de alto albedo reduce la cantidad de radiación solar absorbida a través de revestimientos de edificios y estructuras urbanas y mantiene sus superficies más frías (Taha et al., 1992). Depende de la disposición de superficies, materiales, pavimentos, revestimientos, etc. El albedo de una ciudad varía en función de diferentes factores como la orientación de la superficie, la heterogeneidad; los materiales para construir techos, pavimentos, aplanados o recubrimientos exteriores, entre otros (Bouyer et al., 2009). Si el albedo de la superficie urbana es bajo, esto podría almacenar más energía solar y el aumento de la temperatura urbana. En la literatura, se establece que el efecto de la energía reflejada por los materiales puede contrarrestarse por los espacios verdes que atenúan la intensidad de la isla de calor urbana, haciendo que se caliente menos el aire de las ciudades (Nikolopoulou, y Steemers, 2003).

La variación térmica no es la única consecuencia de las alteraciones microclimáticas en las ciudades, otro factor meteorológico que se ha visto modificado es el viento, ya que la presencia de edificios modifica su dirección o la proporción de humedad atmosférica (Kamal, et al., 2009). En este último trabajo, el viento se relaciona directamente con las propiedades de los materiales constructivos del espacio urbano. Otras variables por considerar en el estudio del microclima urbano son la humedad relativa y temperatura del aire.

2.2.3 Efecto térmico de superficies cementadas/pavimentadas en el sistema urbano

El sobredimensionamiento de las calles, las plazas, los estacionamientos, las fachadas de los edificios, entre otras estructuras que conforman los centros urbanos, tienen un importante efecto térmico, sobre todo cuando las superficies son cubiertas con pavimentos con un alto poder calorífico, a estos pavimentos se les conoce como pavimentos “duros” (Caballero, 2004). La utilización de estos materiales y la amplitud de estos espacios, tiene como

consecuencia la acumulación de calor el cual es absorbido y emitido al ambiente en onda larga, este proceso genera significativamente el aumento de la temperatura en los centros urbanos. Esto se debe a la suma de varias superficies cementantes o pavimentadas que en conjunto absorben, retienen y emiten grandes cantidades de energía calorífica. Este efecto se hace extensivo al contar con amplias y numerosas áreas urbanas de este tipo. Una de las variables que refleja indirectamente la cantidad de radiación solar recibida y transmitida por la composición de tales materiales es la temperatura superficial; lo que a su vez genera una alta proporción en el índice de albedo de un área urbana (Mirzaei & Haghghat, 2010; T.R. Oke, 1988a; Santamouris y Asimakopoulos, 2001).

Una de las áreas urbanas que reciben atención en la actualidad por sus efectos en la reflectividad de la radiación solar y las temperaturas ambientales son las superficies de losas o techos de las edificaciones (Cedeño, 2010). Estos espacios tienen especial importancia en su interacción con el ambiente urbano al construirse, generalmente, de manera horizontal en las edificaciones y en horas del día o épocas del año libres de nubosidad. Esta orientación produce una absorción total de los rayos solares, y al mismo tiempo, el reflejo de la misma radiación de forma directa hacia la atmósfera, lo que a su vez produce una superficie que pasa más tiempo calentándose y emitiendo energía calorífica (Givoni, 1998). De esta manera, en varios estudios se indica tanto la importancia como el interés por estudiar tales superficies en el sistema urbano.

Desde la escala local, cualquier área compuesta por amplias extensiones de concreto o asfalto también generan una alta proporción de energía radiante y calorífica cercana (Lee, 1984). Esto significa que en el ambiente inmediato, se pueden detectar altas radiaciones y temperaturas superficiales, que simultáneamente, afecta las condiciones del clima local o microclima (Gartland, 2008). Por lo tanto, los materiales constructivos tienen una participación clave en el microclima urbano (Braaker, 2014), por lo que existen diferentes trabajos de investigación y propuestas desde el sector constructivo para evitar dicho fenómeno. Por un lado, existen propuestas para que los materiales tengan una composición porosa y permeable y por otro se sugieren otras estrategias, como la presencia de elementos naturales a tales espacios que mitiguen las variables ambientales

antes mencionadas.

2.3 EL PAPEL DE LAS SUPERFICIES Y MATERIALES URBANOS

2.3.1 Intercambio radiativo y calorífico de los materiales constructivos

De acuerdo con Camous y Wattson (1986), la radiación es la transmisión de energía calorífica entre dos cuerpos que están a diferente temperatura. De esta manera, la radiación solar representa la emisión de ondas electromagnéticas que llegan a la superficie de la tierra en onda corta, la cual incide sobre los diversos tipos de superficies de distintos materiales que se usan en las edificaciones de una ciudad (Arnfield, 2003). Cuando en un elemento constructivo incide la radiación solar, se calienta y a esto se le llama radiación incidente, ahora bien, para saber el comportamiento radiante de cualquier elemento constructivo hay que tener en cuenta la longitud de onda de dicha radiación y el ángulo de incidencia (Mazria, 1983) además de latitud, el lugar donde se está realizando el estudio es decir la localidad, las estaciones del año, de las partículas en suspensión en la atmósfera, del albedo y del clima del lugar (Camous y Wattson, 1986).

Las propiedades físicas de los materiales constructivos de una ciudad se calientan por efecto de la radiación solar, lo que provoca que durante el día se acumule calor, el cual incide en la atmósfera durante la noche, haciendo el aire más caliente dentro de la ciudad, a diferencia de las zonas rurales que tardan más tiempo en calentarse que en enfriarse (Nuruzzaman, 2015). La variedad de materiales impermeables urbanos, y las sombras que proyectan los edificios, y el trazado de calles modifican los balances de radiación entre el suelo y el aire, reduciendo la evaporación y la velocidad del viento, pero aumentando la turbulencia del aire (Arnfield, 1990). Todos estos factores se traducen en un clima urbano caracterizado por temperaturas más altas que sus alrededores.

La mayoría de los materiales de construcción urbanos son impermeables y resistentes al agua, además, estos pueden ser de color oscuro que facilitan una mayor concentración y captura de la energía radiante (Gartland, 2011; Connors et al., 2013; Radhi et al., 2013; Prashad, 2014). Estos materiales tienden a almacenar más calor durante el día,

que se disipa gradualmente en la noche por convección al aire que les rodea. Cuando la estructura urbana se caracteriza por corredores urbanos estrechos, la captura de radiación aumenta la temperatura de la superficie y la recirculación del flujo de aire se reduce, conduciendo las temperaturas de aire a una mayor altura (Gartland, 2011).

En las zonas urbanas, el calor reflejado por un edificio es atrapado por los edificios cercanos más altos lo cual se conoce como dosel urbano (Masson, 2006). Además, la velocidad del viento se reduce, provocando que el enfriamiento por convección disminuya, y que el calor atrapado en este dosel no pueda ser expulsado hacia fuera (Priyadarsini et al., 2008). Por otro lado, en el centro de las ciudades, los gases de escape de los vehículos y los contaminantes industriales también atrapan la radiación solar, elevando la temperatura del aire (Bousse, 2009).

Por otro lado, los tejados oscuros absorben el calor de la radiación solar, mientras que los techos de color claro con propiedades aislantes no protegen contra el frío ya que reflejan la radiación solar (Akbari et al., 2001). Los materiales de techos con albedo bajo absorben el calor solar consumiendo más energía de aire acondicionado; por lo que una estrategia de mitigación sería el uso de materiales sustentables. Sailor (2006) sugiere los materiales para las edificaciones, incluyendo los techos deben ser de color blanco. Se pueden utilizar como materiales para techos, además de que la acción de la convección de de estos, tienen un papel importante en la eficacia de las estrategias de mitigación del efecto isla de calor urbano.

La reducción en la temperatura superficial disminuye la intensidad de la radiación de onda larga; lo que implica que las temperaturas del aire ambiente local y a favor del viento, son menores debido a los flujos más pequeños de calor convectivo de las superficies más frías, disminuyendo el consumo de energía de enfriamiento en las zonas urbanas, particularmente en las ciudades de clima cálido (Taha, 1997). Por ejemplo, Taha et al., (1988) reportaron que, en climas cálidos de latitudes medias, las temperaturas del aire vespertino de verano se pueden reducir hasta en 4°C cambiando la coloración de las superficies.

Por otro lado, los edificios, carreteras y otras infraestructuras urbanas, también

influyen en que las ciudades sean más calientes que las zonas rurales adyacentes. A la luz del sol, materiales impermeables como el concreto, el asfalto y los techos de tejas se pueden calentar mucho más que las zonas vegetadas, ya que éstas últimas tienen más humedad, haciendo que las temperaturas superficiales en las ciudades sean más calientes a mediodía que en áreas rurales, debido a que estos materiales impermeables al liberar el calor más lentamente provocan que las temperaturas del aire urbano sean más altas durante la noche (EPA, 2008). Además de dichas alteraciones, las ciudades cuentan con fuentes de calor antropogénico, es decir el calentamiento que generan las áreas industriales y su carga vehicular. En contraste, las cubiertas con vegetación y los árboles urbanos tienen la capacidad de mantener las áreas más frescas que los espacios sin áreas verdes.

2.3.2 Condiciones térmicas de superficies cementadas y superficies vegetadas

Las temperaturas de algunos materiales constructivos urbanos calientan la superficie que los rodea, teniendo diferencias muy importantes con respecto a las temperaturas de las áreas verdes que se encuentran dentro de la ciudad. Por ejemplo, la temperatura superficial del pavimento puede alcanzar hasta 50°C tras la incidencia de rayos solares directos en días soleados, en contraste del pavimento sombreado por árboles en donde suele ser menor de 30°C. (SEDEM, 2008). Esto significa que la vegetación parece ser la medida más eficaz para reducir el fenómeno de la isla de calor urbano. Las ciudades, donde las plantaciones de árboles a gran escala no es factible, se recomienda el uso de materiales de albedo alto y pavimentos permeables. Así, el aumento de la cobertura de vegetación es una de las estrategias más efectivas para mitigar los efectos del microclima urbano (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Synnefa et al., 2008). La vegetación contribuye a reducir el efecto de la isla de calor urban debido a un mecanismo natural denominado evapotranspiración (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003). Según Steeneveld et al. (2011), la temperatura del aire generalmente disminuye por 0.6 °C por cada 10% de vegetación adicional. Por esto, las coberturas vegetales pueden ser una solución ante las condiciones

térmicas y ambientales de un sitio determinado.

Al fenómeno en el cual los árboles y la vegetación absorben agua a través de sus raíces y lo emiten a través de sus hojas, se le denomina transpiración; mientras que la evaporación, se refiere a la conversión del agua de un líquido a un gas, por ejemplo, desde el suelo alrededor de la vegetación. Ambos mecanismos se llevan a cabo en superficies vegetadas que interceptan la precipitación en las hojas y otras superficies que en conjunto se denominan evapotranspiración (Brown, 2014., USGS, 2016). La evapotranspiración enfría el aire usando calor del aire para evaporar el agua, y en combinación con sombreado, puede ayudar a disminuir las temperaturas máximas del aire en las épocas de calor. En el sistema suelo-planta atmósfera, la evapotranspiración es una variable que modera los de climas cercanos a la superficie, cálidos y áridos particularmente en latitudes medias y bajas. En condiciones adecuadas, este fenómeno puede crear “oasis” que son de 2 a 8 °C más fríos que sus alrededores (Oke, 1987; Taha et al., 1989, 1991). En condiciones extremas de oasis, el flujo de calor latente puede ser tan grande que el flujo de calor sensible se vuelve negativo, lo que significa que el aire reciba mayor cantidad de humedad y enfríe su temperatura (Ramos-Palacios, 2012).

Los materiales urbanos y la vegetación son diferentes en propiedades térmicas y aerodinámicas. Por lo tanto, el reverdecimiento de áreas urbanas podría influir en la temperatura del aire a través de diferentes procesos (Shishegar, 2014). Uno de estos procesos y el más esencial es la evapotranspiración que significa la pérdida de agua de una planta en forma de vapor a la atmósfera. Este proceso consume energía solar y aumenta el calor latente más que sensible. Las hojas se enfrían a través de la evapotranspiración y por lo tanto la temperatura del aire circundante disminuye. En una situación ideal, la evapotranspiración podría afectar significativamente el proceso de enfriamiento y enfriar la temperatura del aire alrededor de espacios verdes en un intervalo de 2 a 8°C en comparación con las áreas circundantes (Taha, 1997).

Pueden existir diferentes espacios urbanos donde la vegetación participa tanto en el clima urbano como en el microclima como los bosques urbanos, parques y jardines de una ciudad con importantes servicios urbanos (Pataki, et al., 2011). Además, las superficies

verdes de una ciudad se pueden incrementar debido a la naturación de otros espacios, aprovechando las superficies edificables. Actualmente, en varias ciudades se pueden notar ejemplos como los jardines verticales, terrazas, muros y techos o azoteas verdes.

Según Wong (2005), los techos en las ciudades representan alrededor del 21 al 26% del área de la ciudad. Por lo tanto, si los techos son verdes por la cubierta de vegetación, estos tendrán un papel importante en la mitigación del efecto de isla de calor urbano. Los techos verdes absorben el calor y filtran el aire, manteniendo baja la temperatura ambiental (Getter, 2006). Las plantas utilizan la energía térmica para llevar a cabo la transpiración, haciendo el ambiente más fresco. Como también absorbe el agua, se mantiene en sí más frío, ayudando a reducir la temperatura. Además, los techos verdes aportan al balance energético del edificio al mantener la demanda de energía baja (Nicholson, 2003).

2.4 PARTICIPACIÓN DE LOS TECHOS VERDES EN EL MICROCLIMA

2.4.1 Tipos de techos verdes y áreas vegetadas

Una característica común en los techos constituidos por materiales de construcción tradicional es que sus superficies produzcan más condiciones de calentamiento que de enfriamiento en el ambiente. A través de la reducción de la temperatura superficial de los techos se pueden mejorar las condiciones térmicas del ambiente urbano. Esto se puede obtener mediante la sustitución de superficies de techo tradicionales con la naturación de azoteas o techos verdes que ofrecen temperaturas mucho más bajas durante el verano para mejorar su desempeño térmico y reducir los efectos de la baja absorción de la radiación solar (Krüger & Emmanuel, 2013). Así mismo, Akbari et al. (2003) y Susca et al. (2011), mencionan que los techos constituyen del 20 al 25% de las superficies urbanas. De acuerdo a estudios, los techos son un factor importante en el balance térmico de una ciudad (Akbari et al., 2003; Susca et al., 2011), debido a que sus materiales convencionales absorben del 75-95 % de la energía solar, alcanzando temperaturas de 50 a 90 °C, provocando el aumento de las temperaturas interiores, el incremento de la demanda de

energía para enfriamiento, la reducción del confort térmico, entre otros.

En todo caso, una solución a estas condiciones térmicas puede ser la instauración de techos verdes como parte de la estructura y superficies de lozas y techos en las edificaciones. Minke (2004), reporta en Europa, las máximas variaciones de temperatura de la cobertura de un techo verde comparado con un techo de concreto cubierto de emulsión de bitumen asfáltico y sin cobertura vegetal, cuyo material es capaz de evitar la transminación del agua hacia su superficie. Durante el año las temperaturas tuvieron una diferencia de 100 °C, en verano se obtuvo 80 °C y en invierno -20 °C, por el contrario el techo verde durante ese mismo año la temperatura osciló en 30 °C obteniendo en verano 25 °C e invierno -5 °C. Lo que indica que el techo verde presentó mayor eficiencia térmica.

De acuerdo con lo anterior, son varios los ejemplos donde la vegetación tiene un papel importante en la mitigación de la temperatura ambiental, incluso en superficies como las azoteas verdes. Varios estudios en diferentes zonas climáticas indican que la superficie del material construido puede reducir su temperatura de 15 a 45°C al estar cubierto por plantas, y la temperatura del aire puede oscilar de 2 a 5 °C por arriba de las plantas y el consumo de energía del edificio hasta en un 80% (Papadakis, et al., 2001; Synnefa et al., 2008; Jim y He, 2010; Peng y Jim, 2012, 2013). Los techos verdes han tenido una importante participación en la reducción de la temperatura de las superficie de los techos o azoteas de las edificaciones, lo que puede contribuir al mejoramiento de las condiciones térmicas urbanas, así como mejorar el microclima a escala de barrio (Peng, L. L., & Jim, C. Y. 2013). La aplicación de esta técnica constructiva y de naturación ha contribuido a obtener mejoras en la mitigación de la contaminación del aire, valor estético en el entorno urbano y el enverdecimiento de las ciudades, además de brindar beneficios en cuanto al confort térmico. (Arabi et al., 2015)

A continuación se presenta una descripción de los tres tipos básicos de naturación de azoteas o techos verdes que existen, según la norma federal mexicana NADF-013-RNAT-2007: La azotea con naturación extensiva. Esta se aplica sobre una cubierta de una edificación cuyo acabado vegetal es de un tratamiento extensivo creado por medio de añadir capas de medio de crecimiento y vegetación sobre un sistema de cubierta

tradicional con requerimientos de mantenimiento muy bajos o casi nulos cuya capa de sustrato no debe ser mayor de 15 cm y en la cual el peso de la capa de sustrato y vegetación (en estado saturado) es de entre 110 y 140 kg/m². De acuerdo a esta norma, las plantas más idóneas para este tipo de naturalización son las crasuláceas. El segundo tipo de naturalización que se conoce es la semi-intensiva y se aplica sobre una cubierta o azotea de una edificación cuyo acabado vegetal consiste en un tratamiento Semi-intensivo creado por medio de añadir capas de medio de crecimiento y vegetación sobre un sistema de cubierta tradicional con requerimientos de mantenimiento normales cuya capa de sustrato es de 15 cm como mínimo a 30 cm máximo y en la cual el peso de la capa de sustrato y vegetación (en estado saturado) generalmente es entre 150 y 250 kg/m² o 140 y 250 kg/m². El tipo de plantas indicadas para este tipo de naturalización son las crasuláceas, arbustos, setos y plantas intermedias. El tercer tipo de naturalización es la intensiva, esta de igual manera se aplica sobre una cubierta o azotea de una edificación cuyo acabado vegetal consiste en un tratamiento intensivo, creado por medio de añadir capas de medio de crecimiento y vegetación sobre un sistema de cubierta tradicional con requerimientos de mantenimiento normales o frecuentes cuya capa de sustrato es de 40 cm como mínimo y en la cual el peso de la capa de sustrato y vegetación (en estado saturado) es superior a los 250 kg/m². Las plantas que se utilizan para este tipo de naturalización son de mayor tamaño como arbustos grandes y árboles, aunque también se pueden utilizar las Crasuláceas y diversos tipos de pastos.

2.4.2 Proporción y densidad de especies vegetales

Es importante tener una buena selección de las especies vegetales, ayuda a conocer la proporción y densidad para su aplicación en los techos verdes, siendo que también intervienen varios factores en su selección (Li y Yeung, 2014). Entre los factores que influyen en la selección de las plantas en un techo verde están: el climático, los tipos de plantas, su tamaño, sustratos, densidad y mantenimiento. De acuerdo con esta selección será el efecto del desempeño y los beneficios que brinde un techo o azotea verde (Zhao, et

al., 2014; Younga, et al., 2014). Según la Asociación Mexicana para la Naturación de Azoteas se deben seguir ciertas recomendaciones para asegurar e incrementar la tasa de sobrevivencia de las plantas. Por ejemplo, la profundidad de sustrato estará dada de acuerdo con el tipo de planta y el tipo de sistema de naturación (techo verde). La Asociación Mexicana para la Naturación de Azoteas recomienda para el tipo de sistema extensivo, las crasuláceas ya que son las más adecuadas para climas áridos y semi áridos, sus raíces no requieren más que una profundidad del sustrato de 25 a 76 mm. En cambio, en el sistema intensivo se pueden emplear pastos donde el sustrato estará a una profundidad de 152 a 250 mm. Además, para este mismo tipo de naturación se aplican arbustos cuya profundidad del sustrato debe ser de 457 a 610 mm, 610 mm a 91 cm para arbustos y árboles pequeños, y ya para árboles de mayor tamaño es de 191 cm. (AMENA, 2010; Kumar & Mahall, 2016).

Es fundamental tener un criterio de selección para las plantas ya que existen diferentes factores que son decisivos. Según Minke (2004), los siguientes aspectos pueden servir para una mejor naturación de los techos: El espesor del sustrato y su efectividad de almacenaje de agua, la Inclinação del techo (cuanto más inclinado es el techo, mayor debe ser su efectividad para el almacenaje de agua), la exposición al viento (hace que aumente la evaporación), la orientación (los techos que están inclinados hacia el sol se secan más rápido), otro factor es la sombra y el número de precipitaciones (identificar las zonas de mayor y menor precipitación en la ciudad).

2.4.3 Efecto de la azotea verde en el confort térmico y la habitabilidad

El empleo de los techos verdes trae consigo grandes beneficios, además de mejorar el aire urbano produciendo oxígeno y consumiendo CO². Atrapan pequeñas partículas de polvo, reduciendo la contaminación ambiental de un 10 a un 20% (Akbari,2002). Ayudan a retener agua de lluvia en un 50 a un 90%. Proporcionan nuevos hábitats para plantas y animales (Elmqvist et al., 2015). Además de estas funciones ambientales y ecológicas, también los beneficios impactan en la vida de las personas cercanas a un techo verde.

Entre las principales funciones de los techos verdes está la reducción de altas temperaturas en el interior de las edificaciones. La naturación de las azoteas por medio de plantas y pastos mejoran el confort térmico de los interiores, de este modo se consigue obtener una mejor sensación térmica y calidad del ambiente interior para los habitantes. Según la norma ISO 7730 (2007), de carácter internacional, el confort térmico en términos generales “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con la temperatura ambiental”. Dicho de otra manera, según EULEB (2007), el confort térmico se define como la condición en la que el usuario siente satisfacción respecto al ambiente térmico en el que está. Para el diseño de techos verdes, los rangos de los diferentes grados de percepción humana y el estrés fisiológico se dan de acuerdo con Matzarakis et al., (2010) en los siguientes parámetros: Para la temperatura equivalente fisiológica de 18-23 °C la percepción térmica es cómoda y su estrés fisiológico es nulo. Para el rango de 23-29 °C la percepción térmica es un poco caliente, en cambio el estrés fisiológico es ligero por calor. Para 29-35 °C la percepción térmica es calentar y el estrés fisiológico es por calor moderado. Para 35-41 °C la percepción térmica es caliente y el estrés fisiológico por calor es fuerte, por último para mayor de 41 °C la percepción térmica es muy caliente y para el estrés fisiológico el calor es extremo. Es importante conocer los rangos de los diferentes grados de percepción y estrés fisiológico para el diseño de las edificaciones ya que con ello se logra un mayor confort térmico.

El aire de las ciudades, continuamente contaminado por diferentes agentes y fuentes, incrementa la temperatura ambiental, los problemas de salud y con ello problemas relacionados con los recursos naturales. Para aminorar estos efectos negativos y como posible solución la instalación de techos verdes en las edificaciones puede brindar múltiples beneficios ambientales y de confort térmico. Entre los beneficios más frecuentes de los techos verdes se encuentran la mitigación de temperaturas extremas, la contaminación del aire, la gestión de las aguas de escorrentía, el mejoramiento de la salud pública, la reducción de la demanda de energía de enfriamiento y de calefacción en los edificios, el mejoramiento del confort térmico interior de las edificaciones, entre otros beneficios. Estos beneficios son tan solo algunas vertientes para continuar nuevas

investigaciones en tales temas. Aunque distintos organismos de gobierno y privados se esfuercen por mejorar la calidad del aire en las ciudades, la investigación en diferentes aspectos sobre los techos verdes también cumple un compromiso importante para la sociedad y el entorno urbano. No obstante, aún falta mucho por hacer al necesitar cambios sustantivos en materia del ámbito constructivo y por parte de todos los actores en la sociedad. Este puede ser un comienzo para alcanzar una mejor calidad de vida y con ello el mejoramiento de la habitabilidad urbana.

CAPITULO 3

CAPÍTULO 3

METODO

3.1 DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

3.1.1 Ubicación geográfica y entorno climático de la ciudad de San Luis Potosí.

San Luis Potosí, capital del estado de mismo nombre, es una ciudad con influencia virreinal que tiene su origen en 1592 y, tras el desarrollo minero ha pasado hacia la modernidad impulsada por el urbanismo moderno (Azevedo et al., 2013) y actualmente inclinada al desarrollo industrial entre otras iniciativas. La ciudad tiene una ubicación geográfica importante al comunicar las parte sur y norte del país, además del paso necesario del Golfo de México hacia el interior. Su localización geográfica es 24° 29' 29" norte y 102° 17' 46" oeste y colinda al norte con los estados de Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas; al este con Tamaulipas y Veracruz de Ignacio de la Llave; al sur con Hidalgo, Querétaro y Guanajuato; al oeste con Zacatecas (INEGI, 2013). La ciudad San Luis Potosí se localiza en la Altiplanicie Mexicana y su ubicación geográfica está en los 22.3° latitud norte, longitud; 100.9° Oeste, con una altitud de 1,887 MSNM (Aguillón, 2007).

Esta zona geográfica se encuentra en una zona semidesértica, su flora se compone especialmente de cactáceas y agaváceas, matorrales desérticos espinosos, nopaleras, izotal, cardonal, y pastizal. Su clima se caracteriza; al sur, por ser seco templado y semi seco templado, al norte seco semi cálido y al Centro muy seco templado (Aguillón, 2007). Para la ciudad de San Luis Potosí la temperatura media anual que reporta la Comisión Nacional del Agua (1950 a 2014) es en promedio 17.4°C, la temperatura del año más frío es de 15°C, y la temperatura del año más caluroso es de 19.3°C.

3.2 Sitio de estudio

Campus Universitario Poniente, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

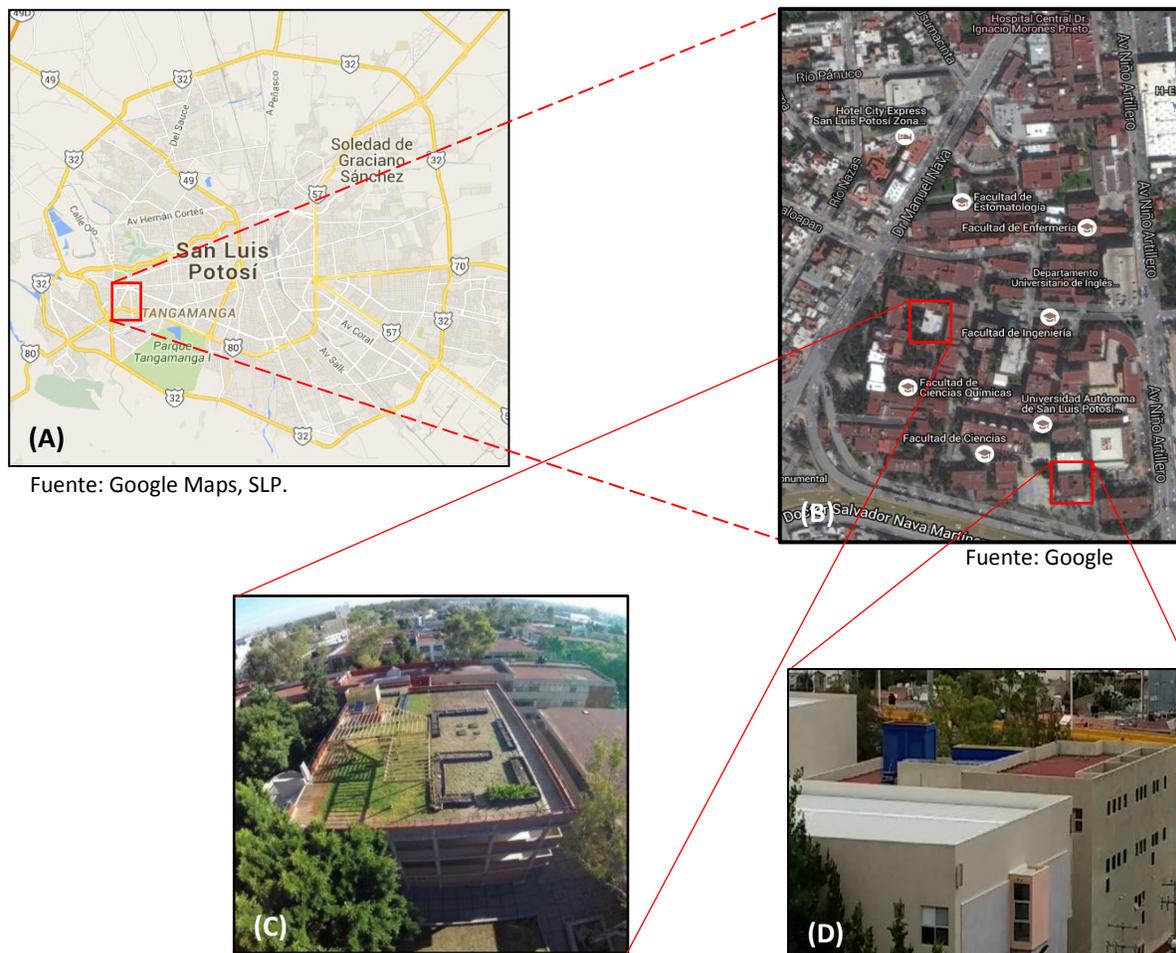


Figura 1. Localización del sitio y Unidades de estudio: A) Mapa de la Ciudad de San Luis Potosí, SLP. México. B). Sitio de estudio: Ciudad Universitaria Campus Poniente, UASLP. C) Unidades de estudio: Unitecho Vivo (UTV), del edificio “B” de la Facultad de Ingeniería. D) Azotea del Edificio del Instituto de Investigación y Posgrado de la facultad del Hábitat.

3.3 Unidades de estudio

Para analizar la relación de los efectos radiativos de los materiales y el comportamiento de la temperatura ambiental entre una azotea verde y una azotea no naturalizada, se escogieron dos unidades de estudio. Estas se encuentran ubicadas dentro del sitio de estudio; el Campus Universitario Poniente de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP),

siendo una de ellas el techo verde llamado Unitecho-Vivo, que en lo sucesivo se identificará con las siglas (UTV). Se encuentra situada en la azotea del edificio “B” de la Facultad de Ingeniería de la misma universidad y la segunda unidad de estudio es la azotea del edificio del Instituto de Posgrado de la Facultad del Hábitat, en lo sucesivo se nombrará como HAB. Este último presenta una losa impermeabilizada sin recubrimiento vegetal.

3.3.1 UniTecho Verde (UTV)

El UTV es el primer techo verde en su tipo, con fines sociales, académicos, de capacitación, y de investigación en la UASLP, además de sus beneficios orientados a la sustentabilidad. Tiene una superficie de 545.69 m² con un sistema naturado de césped, dos andadores de duela colocados a un costado de los pretilos oriente y poniente, seis camas de cultivo y tres galerías a nivel de suelo para el cultivo de diversos vegetales hortícolas. Por sus características se clasifica en un techo verde de tipo semi-intensivo por contener césped ornamental y especies vegetales pequeñas, entre otras, pero también entra en la clasificación de intensivo, ya que el espesor del sustrato es mayor de 15 cm como en las camas de cultivo. Es importante mencionar que por la parte exterior del UTV la ramificación de árboles sobrepasa la altura de dicho edificio, cuyo follaje colinda al sur y al poniente, mientras que al norte colinda con la azotea del edificio próximo (figura 2).



Figura 2. Unitecho Vivo (UTV) del edificio B de la Facultad de Ingeniería de la UASLP.

3.3.2 Azotea sin superficie naturada (HAB)

La superficie de la losa del edificio del HAB está cubierta en su totalidad con una cobertura impermeable prefabricado de 5 mm de espesor, impregnado de gravilla en color terracota y, tiene una superficie de 655.46 m². Cuenta con un (murete perimetral) pretil de 0.78 m de altura de concreto en color beige. Todos los elementos constructivos de la azotea de este edificio son de concreto. Contiene una estructura metálica que constituye un domo formado de vidrio, el cual proporciona luz natural al centro del interior del edificio además de asoleamiento. De esta manera, por tales características y propiedades, se puede considerar que la losa de azotea de este edificio es de tipo convencional (Figura 3).



Figura 3. Vista en sentido lateral de la losa en el edificio de posgrado de la Facultad del Hábitat (HAB) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

3.4 Estrategia metodológica general

Para esta investigación el diseño metodológico consistió en cinco etapas principales. La primera se relaciona con la consulta documental, la segunda correspondió a la investigación de campo, que involucra entre otros aspectos, visitas periódicas al sitio de estudio, así como el uso y la colocación de instrumentos térmicos. La tercer etapa fue la del trabajo en gabinete, donde se procesan los datos recolectados y la cuarta el análisis, donde se presentan los resultados obtenidos, además de su discusión para llegar a las conclusiones del estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Estrategia metodologica general para llevar a cabo la investigación.

ETAPA	ACTIVIDADES	INSTRUMENTOS Y RECURSOS
Documental	Análisis documental científico Análisis de contenido Selección de la información Instrucción del manejo de los instrumentos de medición térmica	Libros, revistas científicas y especializadas, publicaciones electrónicas,
De Medición	Visita al sitio de estudio Visita de reconocimiento Selección de las áreas a monitorear Colocación de instrumentos de medición térmica Recolección de datos y de información Toma de fotografías e imágenes termográficas Levantamiento métrico de las unidades de estudio	Observación Instrumentos de medición térmica (HOBOS) Cámara fotográfica Cámara termográfica Distanciómetro Cinta metrica (5 y 25 m)
Trabajo de gabinete	Elaboración de reportes de lectura numérica Interpretación de la información recolectada Procesamiento de la información Análisis de datos y comparativas Integración de imágenes térmicas, planos descriptivos y arquitectónicos Reporte fotográfico	Software propio de los aparatos de medición. Programa Excel Computadora
Análisis	Comprobación de la Hipótesis Resultados, discusión y conclusión	Verificación de los valores climáticos

3.5 Mediciones de temperaturas ambiente y superficial

Con base a los objetivos planteados, esta investigación se centró principalmente en registrar la temperatura ambiental (TA), superficial (TS) y la humedad relativa (HR %) en las unidades de estudio. El monitoreo de estas variables se realizó en dos periodos, el primero en verano que correspondió a la temporada de calor (junio-julio 2016) y el segundo a la

temporada de invierno en la época de frío (enero-febrero 2017). En tales periodos se evaluaron las temperaturas en las unidades de estudio, es decir en la azotea de UTV y HAB. Previo a las mediciones, en el UTV se determinaron 18 puntos de referencia para la toma de las imágenes térmicas. En el caso del techo HAB se fijaron 8 puntos de referencia en una área de 139.78 m². La altura a la que fue colocado el Hobo en este sitio fué de 1.60 m sujeto a un tripié de madera y protegido con un plato de baquelita. En el caso de los HOBOS para el UTV, el primer sensor se colocó en la estructura de una pérgola a una altura de 2.70 m y el segundo se sujetó debajo de una jardinera a una altura de 1.60 m. Ambos HOBOS se protegieron de la lluvia y la radiación solar directa con una caja protectora, así mismo que mantuviera contacto directo con el ambiente exterior (figura 4).

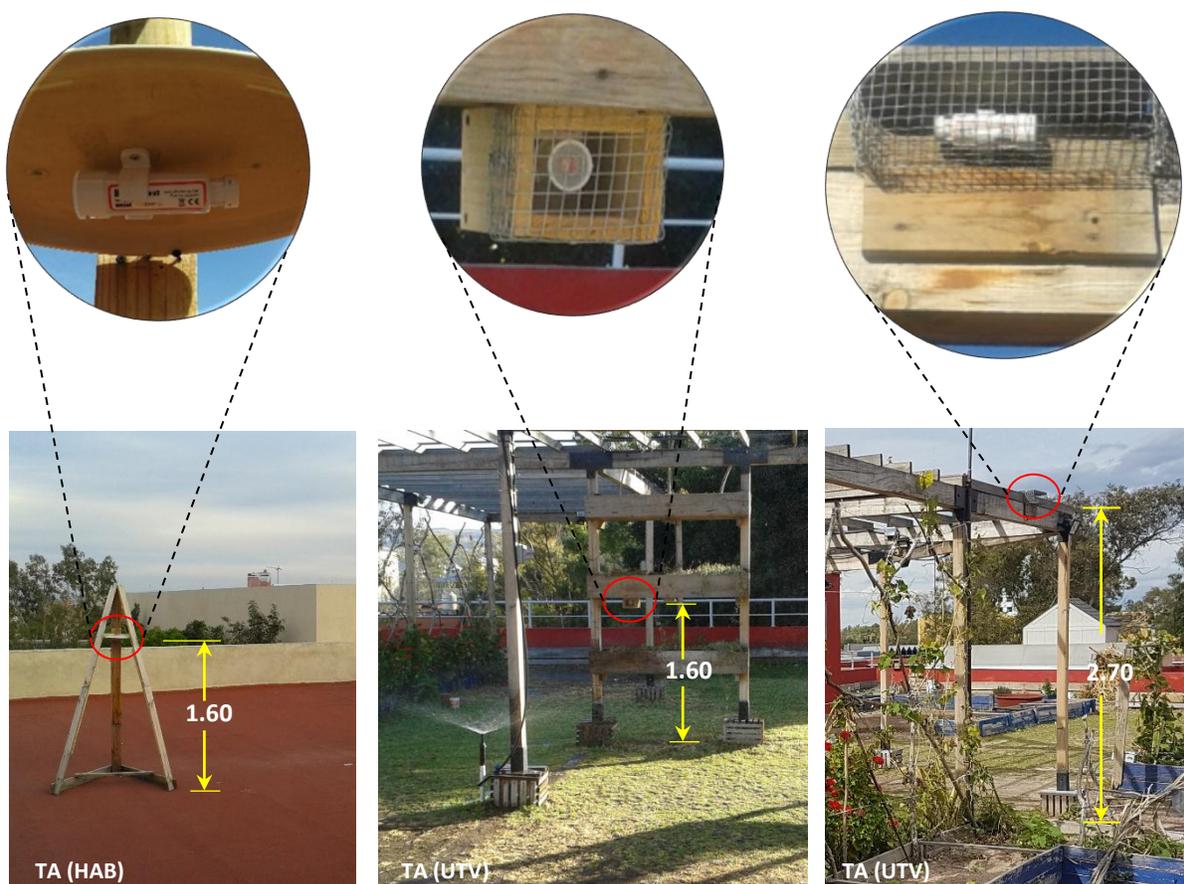


Figura 4. Instalación de los HOBOS para la medición de la temperatura ambiental (TA) en los dos sitios de estudio. En el círculo en rojo se indica el lugar de colocación del sensor HOBOS en HAB y en el UTV (debajo de una jardinera) y UTV (al lado de una viga).

La temperatura y humedad relativa del ambiente fueron medidos con sensores térmicos llamados HOBOS (Pro v2, ONSET HOBO Data Loggers, U.S.A. 2009-2011). El funcionamiento de tales dispositivos presentan un margen de error calibrado de ± 0.21 °C, con un intervalo de 0° a 50°C para la temperatura del aire y $\pm 2.5\%$, y de 10 a 90% para la humedad relativa. Los sensores tipo HOBO fueron colocados en sitios estratégicos programando las mediciones en intervalos de 1 h la temperatura del aire (TA) y humedad relativa (HR %) durante las 24 horas en los períodos de registro antes mencionados. De manera simultánea, se realizaron mediciones de la temperatura superficial y de la radiación del infrarrojo mediante una cámara termográfica, cuyo rango de error es de ± 5 °C (Modelo Ti10, FLUKE Corporation, U.S.A., 2007-2010) en las unidades de estudio. Las imágenes de variación del infrarrojo o termográficas se tomaron desde las 6:00 hasta las 18:00 h, en cada unidad de estudio, con intervalos de 2 horas entre cada registro (figura 5).



Figura 5. Medición de la temperatura superficial (TS) en los dos sitios de estudio, por medio de un procesador de imágenes termográficas. En el cuadro de color amarillo se indican las tomas de las imágenes termográficas en el HAB, en el UTV (en hortalizas) y UTV.

El análisis de ambas temperaturas, ayudó a reconocer la tendencia del incremento de temperatura ambiente por efectos de la radiación que emitieron los materiales constructivos de dichos techos o azoteas. Con los resultados obtenidos de tales mediciones se pudo analizar el efecto del calentamiento del aire y de las superficies respectivamente.

3.5.1 Manejo de los datos de temperatura ambiental y superficial

Para este estudio se consideraron las temperaturas promedio máxima mensual de los meses más calurosos de verano (junio-julio) así como de los más fríos de invierno (enero, febrero). Después del periodo de medición se desmontaron los sensores e inmediatamente se recuperaron los datos registrados en los HOBOS. En el caso de las imágenes termográficas, las temperaturas superficiales fueron tomadas a partir de su visualización por computadora. Una vez obtenida toda la información de manera digital se utilizó el software Excel para construir bases de datos por fecha y hora, y se calcularon los valores promedio por cada día y mes evaluados. Con estos valores, se construyeron gráficas por variable ambiental y unidad de estudio donde se pudieron observar los promedios máximos y mínimos de las temperaturas y la humedad relativa en los horarios establecidos. Este procedimiento se aplicó de igual forma a los datos obtenidos del techo de HAB y se antepusieron en una gráfica para observar la tendencia de las oscilaciones térmicas de ambos techos y, con las temperaturas obtenidas de la cámara termográfica. Las imágenes térmicas permitieron interpretar el calentamiento del aire superficial de los sitios de estudio, donde la energía calorífica es absorbida por las superficies de las azoteas. Por otro lado, se seleccionó una fotografía termográfica en tres horarios de medición (6:00 a 7:00., 14:00 y 18 :00 h.) para cada sitio estudiado en cada época evaluada. Otro criterio de selección se relaciona con el hecho de que la imagen termográfica indicara el valor de máxima y mínima temperatura superficial en tales horarios y con la menor interferencia posible en cada una de las imágenes. Con esta información se analizaron las imágenes termográficas y se procesaron los resultados obtenidos.

3.6 Evaluación de las áreas de azoteas de los edificios del Campus Universitario

Con el fin de conocer la extensión de las superficies de las losas de todos los edificios de ciudad universitaria, se solicitó al Departamento de Diseño y Construcción de la UASLP el plano de conjunto (Anexo 1). y arquitectónico (Anexo 2). del campus zona poniente. Este departamento proporcionó dichos planos actualizados hasta el año 2013 en formato

digital. Para el manejo de los datos de dichas áreas, se utilizó el programa AUTOCAD versión 2016 lo que permitió calcular las áreas de las losas de cada uno de los edificios. Se inicia el cálculo de áreas a partir del plano de conjunto y el arquitectónico. Una vez obtenido el total de las áreas de ambos planos, se calculó el valor del margen de error de la superficie total de las azoteas. El desarrollo de este cálculo se describe a continuación.

3.7 Cálculo del margen de error en las áreas de azoteas

Para este cálculo, se empleó la hoja de cálculo Excel para enlistar y clasificar por Facultad las áreas de las azoteas, de esta manera se obtiene la superficie total construida aproximada. Para reducir las diferencias obtenidas entre las áreas de las azoteas de un plano y otro, se tomaron como referencia las áreas reales, resultado de la medida física del UTV y HAB. Cabe mencionar que se utilizó una cinta métrica considerando el ancho de los pretilos de las unidades de estudio. Esto ayudó a corroborar las áreas reales con las de los planos. De acuerdo con el área medida físicamente en las unidades de estudio y en los planos digitales se calculó el valor del margen de error, tanto en las azoteas del UTV y HAB como en las losas de los edificios. El criterio utilizado para la obtención del margen de error fue mediante una regla de tres. Dicho valor se evaluó a partir de la medida real física considerada como el 100 % y la medida en AUTOCAD. La diferencia entre estas dos se consideró como el margen de error de cada área. Para el caso del UTV fue de $\pm 1.4 \text{ m}^2$ y para el caso de HAB fue de 0.9 m^2 .

3.8 Cálculo de la proporción del calentamiento superficial en función del área

Con base en los valores de temperatura superficial, las áreas de los sitios de estudio y la estimación de las áreas de las azoteas en los edificios del campus universitario poniente de la UASLP, se calculó la proporción de calentamiento superficial en función del área (PCS (A)). Este cálculo se obtuvo a partir de la temperatura superficial promedio dividida por el área de cada sitio. Este valor se calculó para cada hora evaluada durante la medición termográfica de cada una de las dos épocas del año estudiadas. De esta manera, se obtuvo

la fluctuación estimada de PCS (A) a lo largo de un día que representa la variación de verano o de invierno tanto para UTV como para HAB. De acuerdo con la variación de tales datos se calculó el error estándar de cada promedio, mostrándose en forma de barras de error en los puntos de PCS (A) en cada gráfica. Estas estimaciones se presentaron en una gráfica para verano y otra para invierno con las respuestas de cada sitio.

Se realizó otro cálculo mediante el agrupamiento de promedios de todo el día en cada sitio y se graficó cada valor, con su respectiva barra de error, para obtener la ecuación de la recta a partir de dos puntos. En esta gráfica se muestra la respuesta de PCS (A) en relación con el área de cada sitio en verano y en invierno. Por último, se empleó la ecuación de ambas rectas para proyectar los posibles valores de PCS (A) en relación con las áreas de todas las azoteas del campus universitario, en donde se localizaron también los valores calculados de UTV y HAB. De esta manera, se presentó la línea de puntos de este cálculo en todas las superficies de azoteas en sus condiciones actuales (sin plantas) y de su proyección si estas presentaran una cubierta vegetal.

CAPITULO 4

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1 Temperatura ambiente (TA)

Las temperaturas promedio registradas por los instrumentos de medición (HOBOS) tanto en UTV como en el techo del edificio del HAB, indicaron las condiciones térmicas del aire (°C) y sus valores promedio. Por la mañana, de 5:00 a 7:00 hrs., la temperatura mínima del UTV fue de 16.3 °C en comparación con HAB que fue de 16.7 °C. Se observa que desde las 7:00 hrs., las respuestas de ambas unidades de estudio fueron aumentando hasta las 15:00 hrs, en donde HAB alcanzó el valor máximo de 29.8 °C, y UTV fue de 28.3 °C. Después de alcanzada la temperatura promedio máxima en ambos sitios, los registros disminuyen desde las 15:00 a las 19:00 h llegando a una temperatura de 25 °C. Al comparar las losas de UTV y HAB las diferencias de temperatura del aire más importantes se encuentran de 12:00 a 16:00 hrs., en donde la diferencia más alta fue de 2.11 °C a las 12:00 hrs. Por otro lado, se observa que la temperatura promedio ambiente de invierno (figura 6) osciló entre los 10 y 11 °C entre las 5:00 y las 8:00 hrs., y después se elevó la temperatura del aire en ambos sitios de manera similar hasta las 10:00 h. A partir de esta última en la mañana las respuestas térmicas se diferenciaron entre los sitios, además se observan las diferencias entre las 11:00 y las 15:00 hrs. En el caso de HAB la temperatura ambiente promedio máxima fue de 25 °C de las 13:00 a las 16:00 hrs., mientras que UTV estuvo por debajo de dicha temperatura en tales horas. En la misma figura se observa que de las 16:00 hasta las 19:00 hrs. la respuesta de los sitios de estudio, además de variar de forma similar, conjuntamente disminuyeron hasta indicar una temperatura promedio de alrededor de los 18 °C.

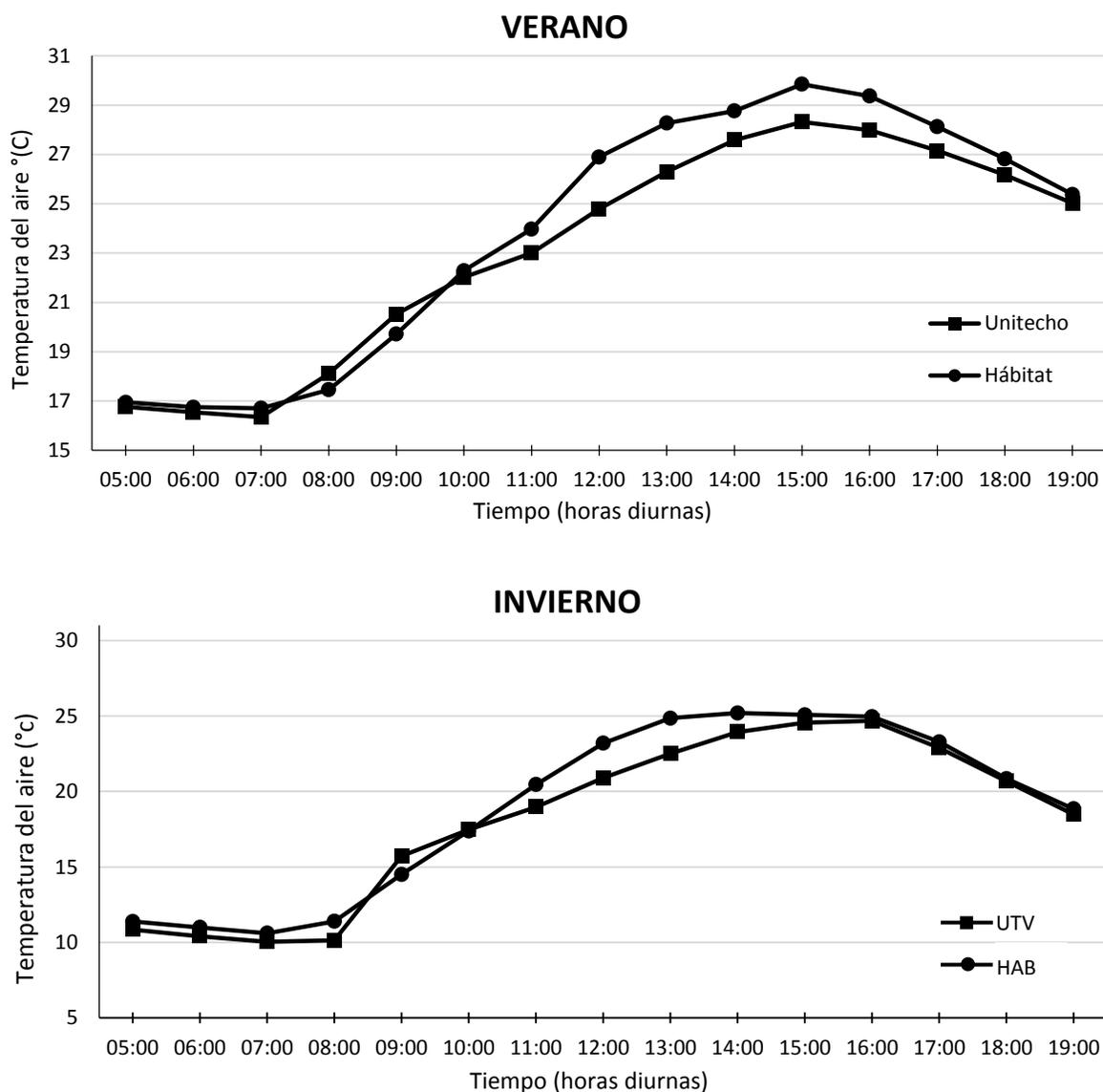


Figura 6. Promedio de la temperatura ambiente (TA) monitoreada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La variación de los datos se distribuye en horas diurnas durante la época de verano e invierno.

Algunos de los resultados térmicos más significativos se relacionan con los valores de temperaturas máximas y mínimas que también se calcularon en los resultados. En la tabla 2 se presentan los valores de temperatura promedio del aire, en donde se muestran las condiciones de temperatura empezando por la general, máxima y la mínima del aire. Estos valores corresponden a las temperaturas promedio de verano e invierno para cada sitio de estudio. De los valores descritos en la tabla 2 se obtuvieron diferencias importantes entre

los dos sitios de estudio. Tanto en la época de verano como de invierno los diferentes valores de TA fueron más altos en HAB que en UTV. Cabe mencionar que la diferencia más alta entre HAB y UTV fue de 1.9 °C y 0.9 °C en la TA máxima de verano e invierno, respectivamente.

Tabla 2. Temperatura Ambiente promedio (°C)

	T A (VERANO)		T A (INVIERNO)	
	HAB	UTV	HAB	UTV
General	23.8	23.1	19.0	18.2
Máxima	30.7	28.8	26.1	25.2
Mínima	17.2	16.7	10.7	10.0

4.2 Humedad relativa (HR)

Durante el período de verano (Figura 7) la respuesta de humedad relativa de ambos sitios de estudio indicó que los valores en la mañana son altos y después disminuyen a partir de las 7:00 hasta las 15:00 hrs, donde se incrementa hasta las 19 hrs. La humedad relativa observada entre las 5:00 a 7:00 hrs., presentó una diferencia menor del 0.9 % entre UTV y HAB, es decir la humedad ambiente fue muy parecida en ambos sitios durante dichos horarios. Esta variable disminuyó considerablemente desde las 8:00 hrs., donde HAB fue ligeramente más húmedo en un 3% que UTV hasta las 9:00 hrs. Es importante mencionar que a las 10:00 hrs. la HR fue menor en HAB que UTV durante las demás horas monitoreadas. La humedad ambiente más baja en HAB llegó a 31.95 y de 36 % en UTV. Al comparar ambas losas las diferencias de HR más alta mostró un valor de 6.9 % entre ambos sitios a las 12:00 hrs. Después de llegar a la HR mínima, la respuesta fue en aumento a partir de las 15:00 hrs, donde HAB se mantuvo siempre con menor humedad ambiental.

En el periodo de invierno (Figura 7) la humedad ambiental se mantuvo entre 58 y 60% en UTV y HAB de las 5:00 a las 8:00 hrs. Después, la humedad del aire disminuyó en ambos sitios donde el valor mínimo en HAB fue de 22.86 % y en UTV de 23.93 % a las 16:00 hrs. Después de esta última hora la humedad relativa del aire se incrementó de manera similar

en ambos sitios hasta las 19:00 hrs. Cabe mencionar que entre 11:00 y 15:00 hrs., se detectaron las diferencias más importantes, mostrando valores ligeramente más altos en UTV que en HAB, en donde 4.3 % corresponde al valor más alto de HR entre los dos sitios.

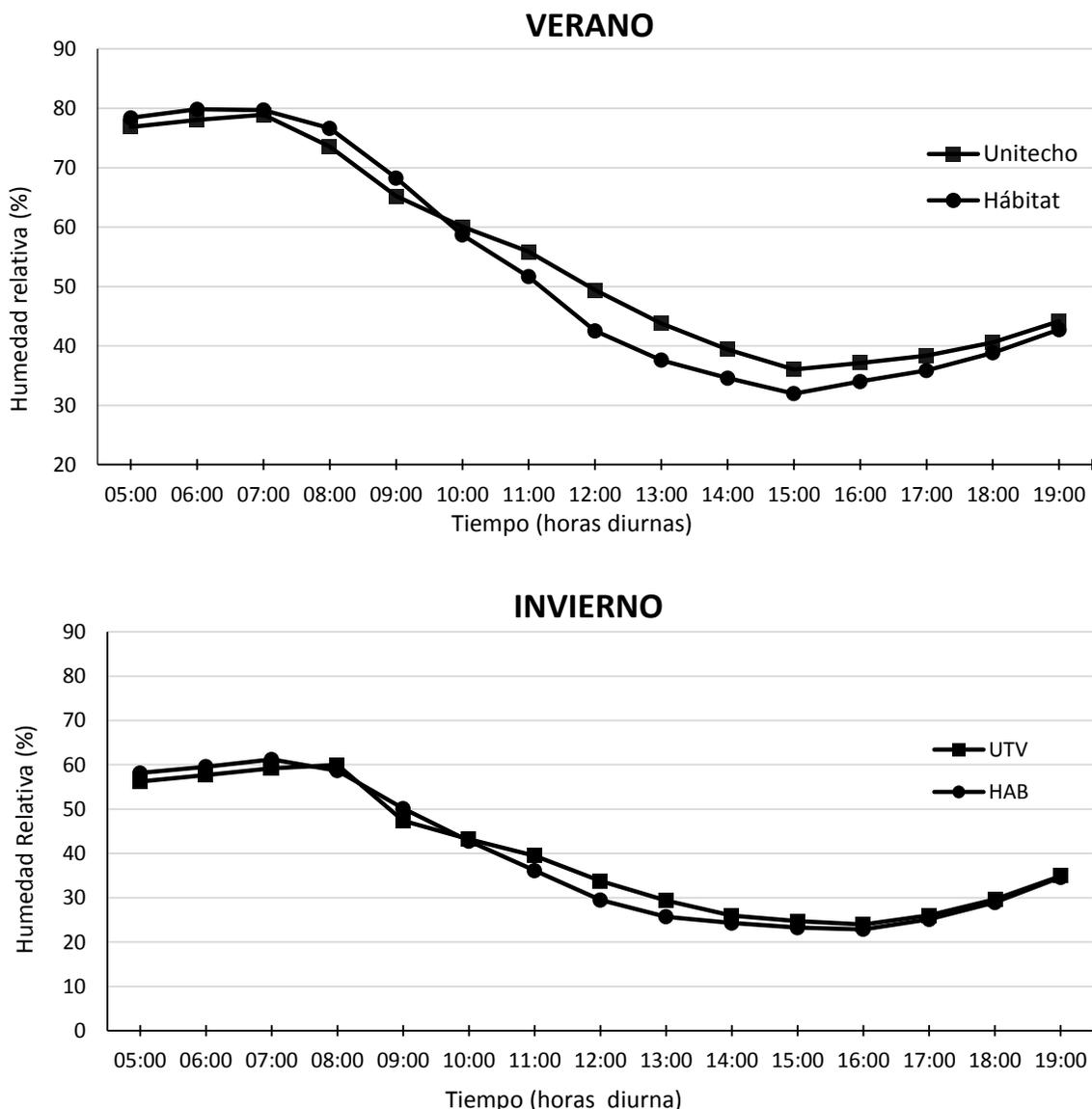


Figura 7. Promedio de la humedad relativa (HR) monitoreada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La variación de los datos se distribuye en horas diurnas durante el verano e invierno.

4.3 Temperatura superficial (TS)

Los resultados correspondientes a las temperaturas superficiales registradas por medio del

procesador térmico de imágenes (camara termográfica) tanto en UTV como en HAB, indicaron las temperaturas superficiales de las azoteas y de éstas se obtuvieron valores de temperatura promedio que posteriormente se graficaron para conocer su respuesta en los horarios establecidos. En la temporada de verano la temperatura superficial de 6:00 a 8:00 hrs., fue menor que en HAB, y a partir de estas horas la respuesta de ambas unidades de estudio aumentaron alcanzando sus valores máximos a las 14:00 hrs., de 58.6 y 38.5 °C en HAB y UTV respectivamente. Después de esta hora la respuesta disminuyó hasta las 18:00 hrs., donde HAB registró 42.4 °C y UTV 28.6 °C. Entre UTV y HAB se encontraron diferencias de TS, las más importantes se encontraron de 10:00 a 18:00 hrs. (Figura 8).

En la temporada de invierno (Figura 8), las temperaturas registradas por medio de la camara termográfica tanto en UTV como en HAB, indicaron las condiciones de temperaturas superficiales promedio del aire local (°C). El registro tomado por la mañana, de 6:00 a 8:00 hrs., indicó los valores mínimos de la TS, 6.6 °C en HAB y 2.6 °C en UTV. A partir de las 8:00 hrs. la respuesta de las unidades de estudio fue en aumento, obteniéndose valores máximos hasta las 14:00 hrs. donde HAB alcanzó el valor más alto de 42.5 °C en cambio la TS del UTV fue de 30.1 °C. A partir de las 14:00 hrs. la respuesta fue disminuyendo hasta las 18:00 hrs., en esta hora la TS fue de 32.3 °C en HAB y con una diferencia menor de 19.5 °C del UTV. Al relacionar los valores de ambos sitios de estudio se observaron diferencias de TS del aire, las más importantes se encontraron de 12:00 a 16:00 hrs., la más alta fue de 17.3 °C, la cual se registró a las 16:00 hrs.

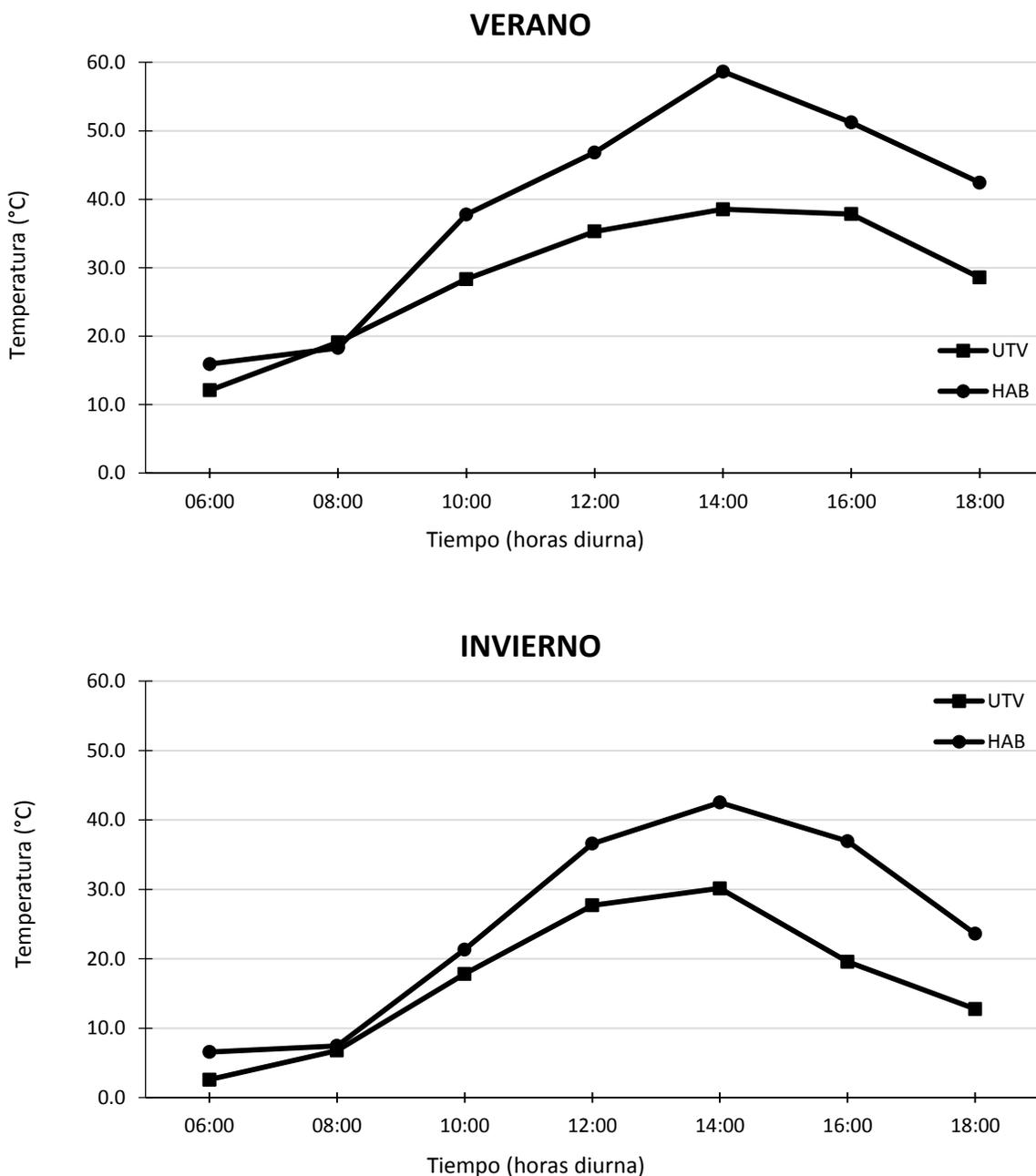


Figura 8. Variación de la temperatura superficial promedio (TS) evaluada en la azotea del edificio del Hábitat (HAB) y en el Unitecho Vivo (UTV). La respuesta se distribuye de las 06:00 hasta las 18:00 h en intervalos de dos horas en verano e invierno.

De la misma manera que se calcularon los valores promedio de TA general, máximas y mínimas también se realizaron para la temperatura superficial (TS). En la tabla 3 se presentan dichos valores para cada sitio de estudio en las dos épocas evaluadas. De los

valores descritos en la tabla 3 se obtuvieron diferencias importantes entre los dos sitios de estudio. La diferencia de temperatura superficial máxima más alta entre HAB y UTV fue de 21.8 °C en verano, y de 6.1 °C en invierno. Se observa que en todos los valores TS siempre fue más baja en UTV que en HAB, excepto en el valor mínimo de verano, donde la superficie naturada fue 0.8 °C más alto que en la azotea del edificio del Hábitat.

Tabla 3. Temperatura Superficial

	T S (VERANO)		T S (INVIERNO)	
	HAB	UTV	HAB	UTV
General	38.7	28.5	25.0	16.8
Máxima	69.8	48.0	45.7	39.6
Mínima	9.8	10.6	3.32	0.2

4.4 Imágenes termográficas de Verano

El espectro infrarrojo de las imágenes del período de verano (Figura 9) muestran las temperaturas superficiales (TS) máximas y mínimas más significativas en los diferentes puntos monitoreados de los sitios de estudio. La escala de color infrarroja de cada imagen indica el valor del grado de temperatura superficial registrada en diferentes horarios y, la escala de colores los valores de la TS. Entre más azul es el color de la imagen más baja es la temperatura superficial y viceversa cuando se presenta el color rojo intenso, mientras que los colores de tono amarillo pueden indicar valores medios. En las imágenes del Unitech Vivo se registró un valor máximo de 60.2 °C a las 14:00 hrs., donde se detectan numerosos puntos rojos y por lo tanto altas concentraciones de calor superficial. Por otro lado, las áreas de tonos amarillos y azules indican menores temperaturas, especialmente en este último color. De esta manera, la superficie de pasto que indica el valor de TS mínimo más alto fue de 21.5 °C a las 14:00 hrs., mostrando una combinación de tonos amarillos y azules, mientras que de 6:00 a 7:00 hrs. dominaron los puntos azules y a las 18:00 hrs. los puntos rojos. Esto puede decir que la superficie es fresca por la mañana y puede permanecer caliente, avanzada la tarde, y posiblemente hasta la noche.

En el sitio de estudio HAB se muestran colores con superficies de mayor calentamiento y liberación de la energía del infrarrojo que en UTV. Cabe señalar que la losa de azotea cuenta con una cubierta impermeable prefabricada cuya superficie es rugosa y plana, además de carecer de una superficie vegetal naturalizada. Así, en HAB el valor máximo de TS fue de 79.8 °C a las 14:00 hrs., indicando la concentración de calor que retiene y emite esta superficie. Aunque el valor de temperatura que detectó la imagen a las 14:00 hrs. fue más alto que el de la imagen tomada a las 18:00 hrs., esta última mostró zonas de mayor acumulación de calor superficial y por tanto de una alta concentración de áreas en rojo. Los colores de las termografías indican las condiciones térmicas de las superficies (Figura 9), es decir son imágenes de un solo registro en una hora fija dentro del estudio. Esta diferencia entre el color y la temperatura de las imágenes, por ejemplo, entre las 14:00 y 18:00 hrs. en HAB, se debe a la variación del sensor en la cámara termográfica. Esto significa que el sensor revela de forma constante la coloración y, fija la escala del color en entre un valor de temperatura máximo y mínimo y va de acuerdo a la temperatura superficial registrada in situ. Sin embargo, es importante aclarar que la escala gráfica de color no es fija en todas las imágenes termográficas, por lo tanto, no hay comparación entre ellas pero sí entre el valor numérico que indica el grado de temperatura superficial de cada imagen.

En las imágenes de las temperaturas superficiales mínimas del UTV, la escala de color infrarrojo mostró una mayor acumulación de manchas azules dispersas entre las amarillas, estas últimas pueden representar una temperatura media y las azules una temperatura más baja. En HAB, el infrarrojo de las imágenes muestra las temperaturas mínimas entre el color amarillo y azul predominando el primero. Finalmente, se puede decir que en las imágenes termográficas los valores de TS máximas y mínimas registradas en el sitio UTV son, en general, más bajas que los valores registrados en HAB. Además, los valores de mayor respuesta del infrarrojo y de las temperaturas altas y bajas correspondieron al sitio de HAB, es decir en la época de verano, la losa de este edificio parece tener condiciones más extremas que las registradas en una superficie verde sobre una azotea.

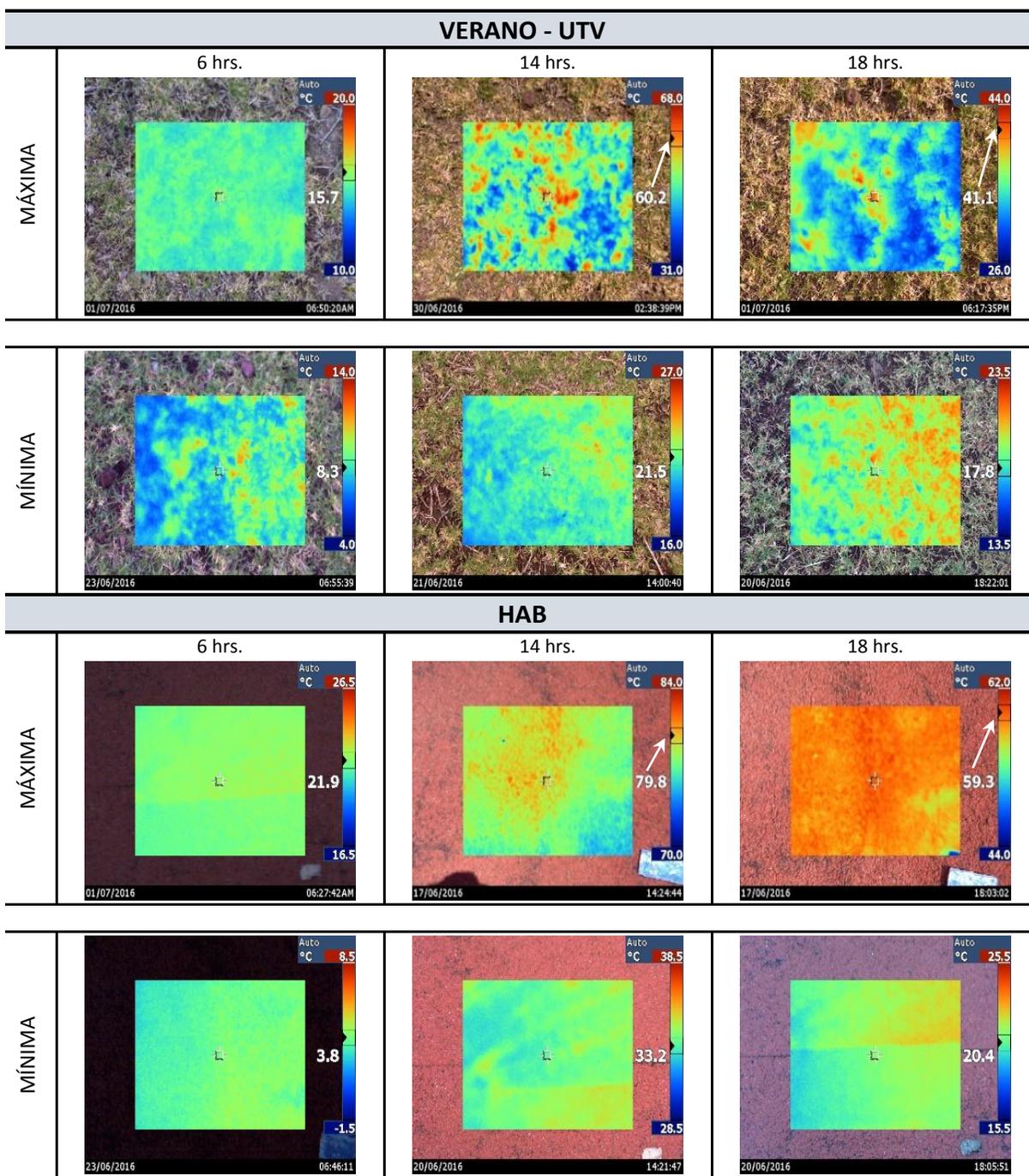


Figura 9. Imágenes termográficas con las TS máximas y mínimas en los horarios establecidos (6:00, 14:00 y 18:00 hrs.) del periodo de verano en UTV y HAB.

4.5 Imágenes termográficas de Invierno

En la figura 10, se presentan las imágenes donde se detecta la radiación del infrarrojo con las temperaturas superficiales (TS) máximas y mínimas más significativas de invierno, correspondientes a los diferentes puntos monitoreados en los sitios de estudio. Por lo general, las superficies de azotea presentaron condiciones frías al iniciar la mañana, temperaturas medias alrededor del mediodía, disminución avanzada la tarde, y probablemente, su descenso durante la noche. En las imágenes del Unitech Vivo se registró un valor máximo de 44.6 °C a las 14:00 hrs., donde se detectó áreas con coloración de amarillo y azul, y por lo tanto menor concentración de calor superficial. En esta misma imagen, las áreas de tonos azules indican menores temperaturas y las de amarillo condiciones de temperatura templada. De esta manera, la superficie de pasto que indicó el valor de TS mínimo más alto fue de 17.6 °C a las 14:00 hrs., y el de menor valor fue de -5 °C a las 7:00 hrs. con un color azul dominante.

En el sitio de estudio HAB, las superficies detectaron mayor liberación de la energía del infrarrojo que en UTV durante la época de invierno. Esto se observa en la imagen de las 14:00 hrs., donde el valor mínimo más alto de TS fue de 51.9 °C, indicando la concentración de calor que retiene y emite esta superficie. En las termografías de las 6:00 y 18:00 hrs. las superficies mostraron baja radiación del infrarrojo indicando áreas de color amarillo en combinación con azul, especialmente, en la última imagen de la tarde. Por otro lado, el valor de mínimo más alto de las superficies en HAB fue de 32.2 °C a las 14:00 hrs. con tonalidades que van de las azules a las amarillas y pocos tonos en rojo. En este mismo sitio, las termografías de las 6:00 y 18:00 hrs. presentaron una coloración dispersa de manchas azules intercaladas con amarillas y muy poca área con emisión del infrarrojo. Finalmente, se puede decir, que en las imágenes termográficas los valores de TS máximas y mínimas registradas en el sitio UTV, tanto en el periodo de verano como de invierno, son en general, más bajas que los valores de HAB. De esta manera, se puede decir que la azotea del edificio de HAB parece tener condiciones más extremas que las registradas en una superficie natural sobre una losa de azotea.

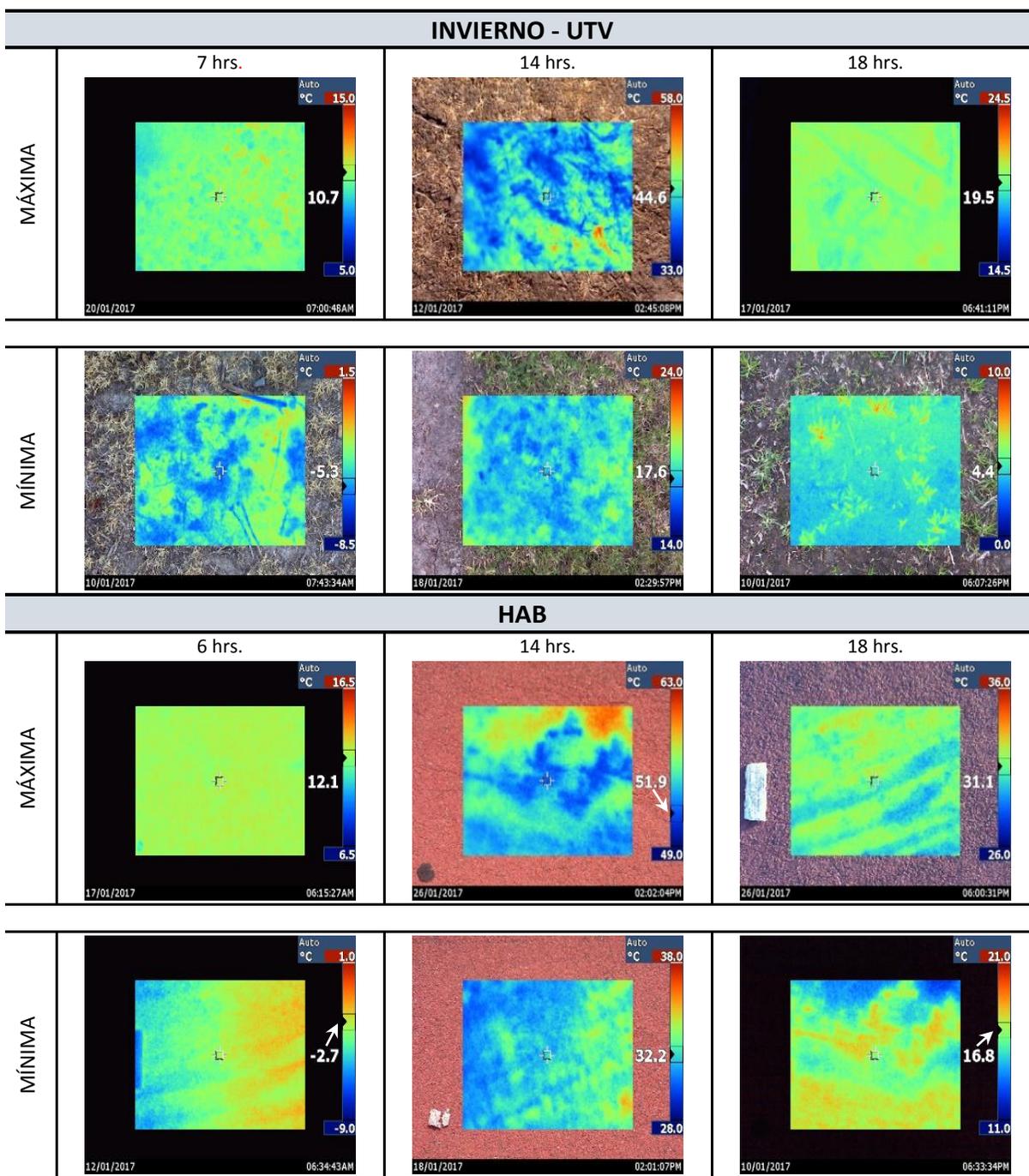


Figura 10. Imágenes termográficas con las temperaturas máximas y mínimas en los horarios establecidos (6:00, 14:00 y 18:00 hrs.) del periodo de invierno en UTV y HAB. En la sección correspondiente a UTV, se presentan las termografías tomadas a las 7:00 hrs.

4.6 Proporción de calentamiento superficial en función del área, PCS (A)

En la figura 11 (a), se muestra la variación de la proporción de calentamiento en función del área para cada sitio, donde los valores de HAB fueron ligeramente más altos que UTV a las 10:00 y 12:00 hrs., aunque las barras de error no mostraron superposición entre sí a las 6:00, a las 14:00, 16:00 y 18:00 hrs. En estas últimas horas, la variación de PCS(A) es suficiente desde el punto de vista estadístico como para señalar que fue mayor la respuesta en HAB que en UTV. También, se muestra en la misma figura que el valor más alto en HAB fue de 0.089 a las 14:00 hrs. y en UTV de 0.07 a la misma hora. Después de estos valores, disminuyó PCS (A) en ambos sitios aunque siempre se mantuvo más alto en HAB hasta las 18:00 hrs.

Por otro lado, en la figura 11 (b) se presenta la proporción de calentamiento superficial del UTV y HAB en invierno, cuyo resultado fue menor que en la época de verano. Durante las primeras horas medidas en la mañana se incrementó la respuesta, teniendo una variación de manera similar de las 8:00 hasta 12:00 hrs. y la superposición de las barras de error de ambos sitios. La variación de PCS(A) alcanzó su valor máximo con 0.064 a las 14:00 hrs. en HAB y de 0.05 en UTV a la misma hora. En las siguientes horas evaluadas, la respuesta disminuyó tanto en HAB como en UTV hasta las 18:00 hrs. Cabe resaltar que a partir de las 14:00 h la respuesta de HAB fue mayor que UTV hasta las 19:00 hrs., ya que la separación de las barras de error en cada una de las horas observadas mostraron que la variación fue independiente entre los sitios.

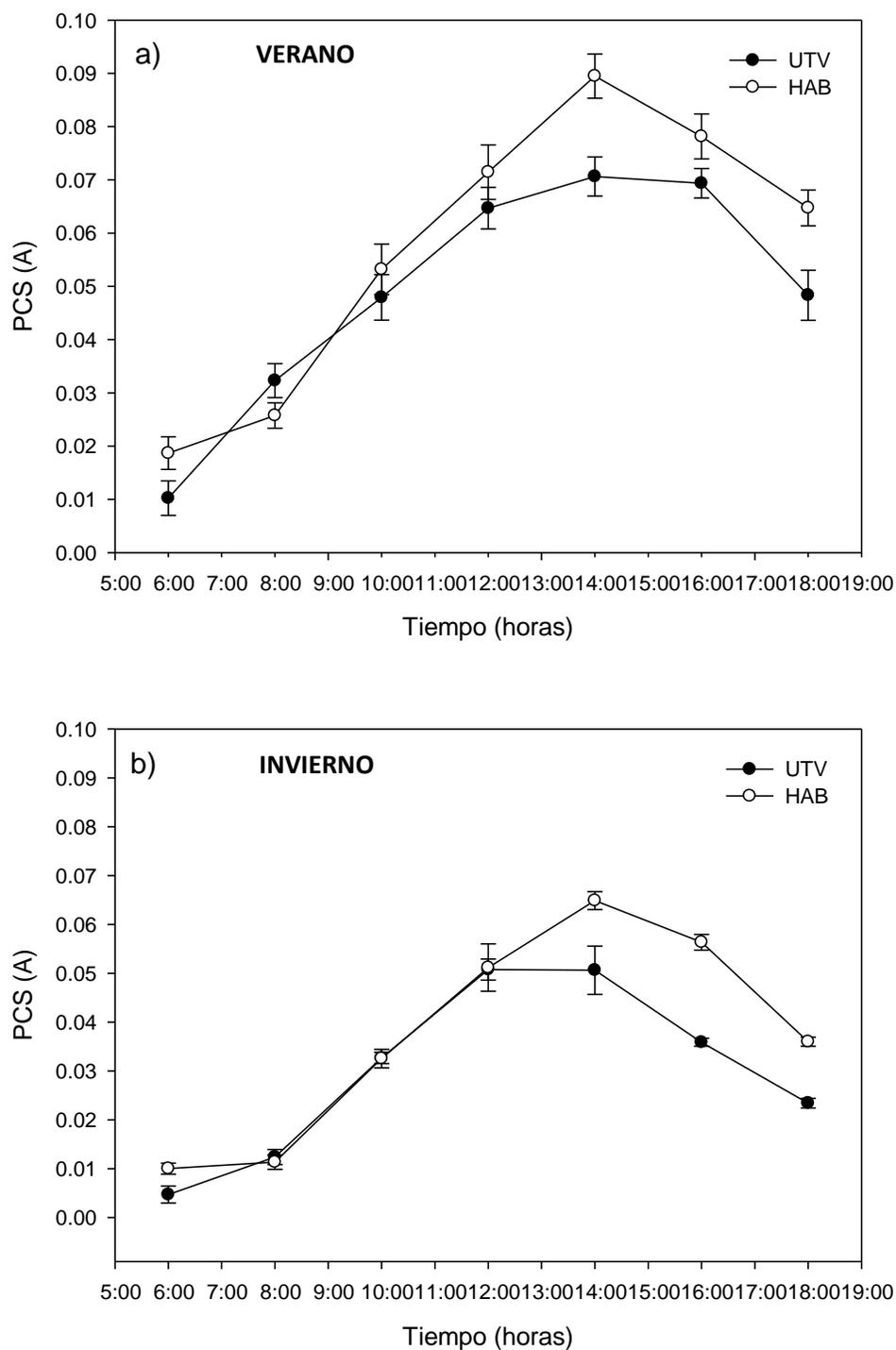


Figura. 11. Proporción de calentamiento superficial en función del área (PCS (A)) durante el horario evaluado en verano (a) e invierno (b) en el Unitecho vivo (UTV) y el Hábitat (HAB).

En la figura 12 se presenta la comparación entre la proporción de calentamiento superficial

en función del área (PCS (A)) entre HAB y UTV. Esta indica la proporción de calentamiento de todos los puntos evaluados durante todas las horas del día de cada época que representa cada punto. Tanto en verano como en invierno, se observa el aumento significativo de PCS (A) del edificio del Hábitat con respecto al del Unitecho Vivo, en donde las barras de error se encuentran separadas entre sí. Por otro lado, se observa que al aumentar la superficie de losa también se eleva la proporción de calentamiento del sitio. Sin embargo, es importante aclarar que las amplias diferencias entre HAB y UTV pueden explicarse por dos factores esenciales: por un lado que la superficie de HAB es mayor por 100 m² mientras que la superficie UTV presenta una cobertura de vegetación.

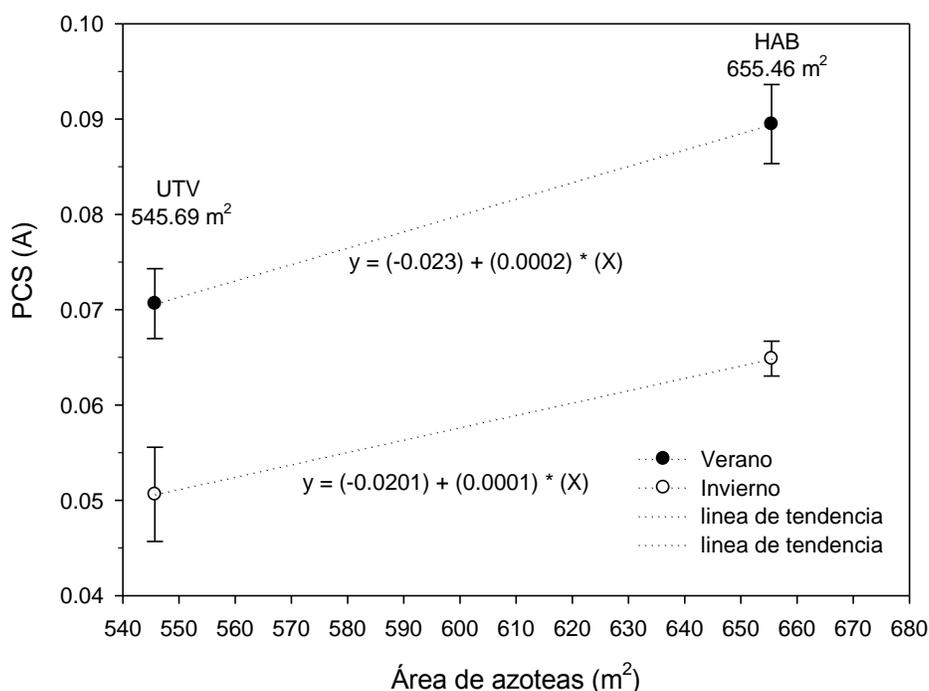


Figura 12. Comparación de la proporción de calentamiento superficial en función del área (PCS (A)) entre las áreas de azoteas del Unitecho vivo (UTV) y el Hábitat (HAB), de acuerdo con la ecuación de la recta, en verano e invierno

4.7 Extrapolación de PCS (A) en función de azoteas de edificios del Campus Pte.

Se calculó una extrapolación de las condiciones térmicas superficiales en dichas épocas estacionales para conocer la proporción de calentamiento en función del área total (m^2) correspondiente a las losas de los edificios de ciudad universitaria poniente. En la figura 13 se presenta la extrapolación de la PCS (A) de las azoteas de los edificios de C.U. en su condición actual (representados con símbolos negros) y en su proyección con cubierta vegetal (representados con símbolos blancos). Se observa que la proporción del calentamiento superficial se incrementa al aumentar las áreas de azotea. Existe un gran número de edificios con superficies aproximadas a $900 m^2$ donde se localizan UTV y HAB. En azoteas que van de $1,000$ a $1,500 m^2$, aproximadamente, se sitúan 5 edificios. Con superficies de alrededor de los $2,000 m^2$ se ubican azoteas de 4 edificios y de los $2,500 m^2$ hasta los $3,200 m^2$ se detectaron las áreas de las azoteas de 5 edificios más. Se observa también que las azoteas con vegetación en ambos períodos de observación reducen la proporción del calentamiento superficial que se representan con los símbolos blancos que se observan debajo de la línea de los símbolos negros. De esta manera la proporción de calentamiento superficial promedio fue de 0.16 y 0.14 de las azoteas sin y con vegetación, respectivamente, en el período de verano. Mientras que en el período de invierno estos valores fueron de 0.07 y 0.05 en las azoteas con y sin vegetación, respectivamente. En la respuesta de verano, en los símbolos donde se señala la azotea del UTV se aprecian traslapados porque es el mismo valor de la proporción del calentamiento en los datos proyectados con y sin vegetación. En el caso del HAB, se señala la localización del valor en la línea de los puntos tanto de la PCS(A) con y sin vegetación en los dos períodos estudiados.

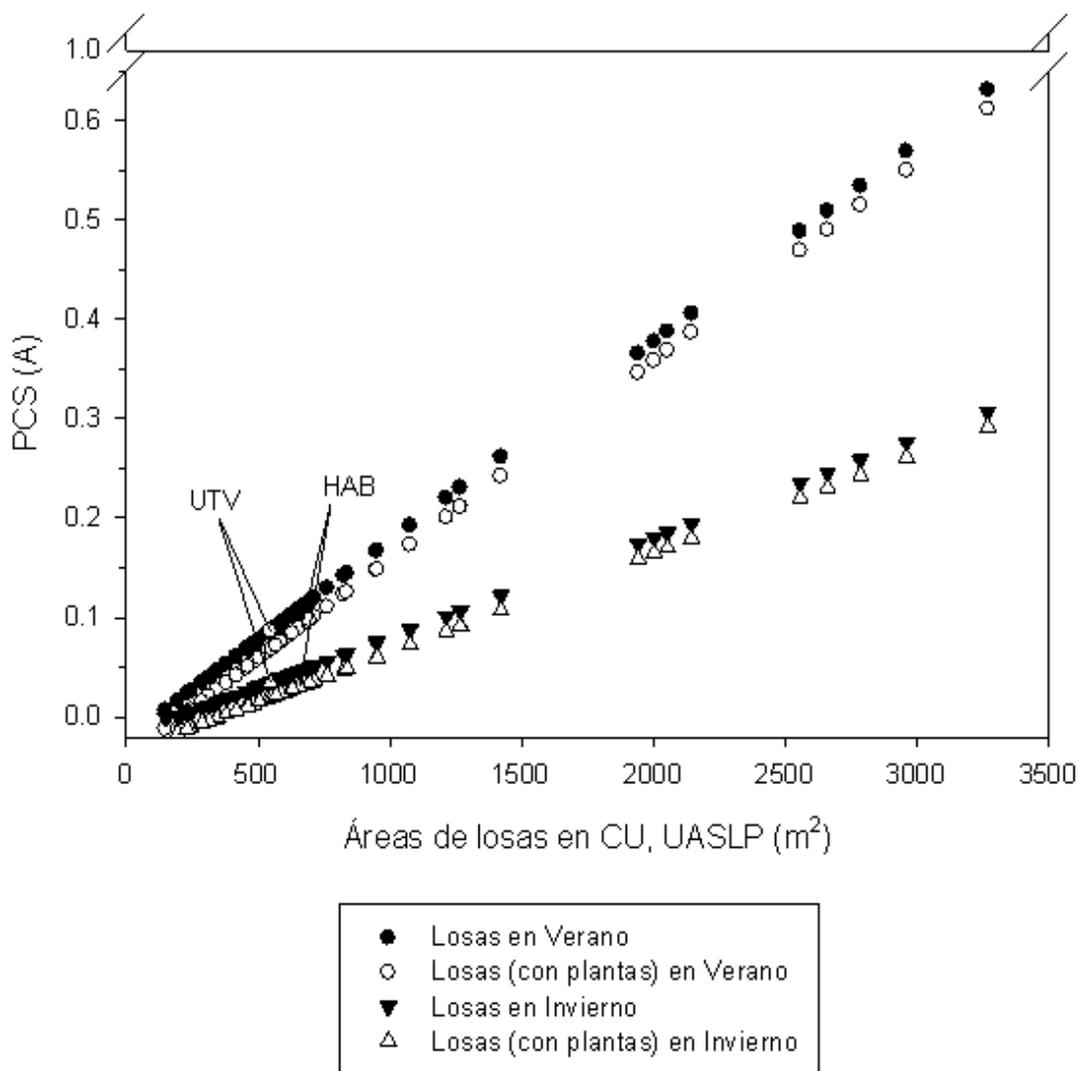


Figura. 13. Extrapolación de PCS (A) en el áreas de azoteas del Campús Poniente de la UASLP a partir del Unitecho Vivo (UTV) y el Posgrado del Hábitat (HAB) en verano e invierno.

CAPITULO 5

CAPITULO 5

DISCUSIÓN

5.1 Temperatura ambiente y temperatura superficial.

El incremento de la temperatura ambiente más significativo en este estudio fue durante las horas de la mañana hasta el mediodía. La temperatura ambiente disminuyó después de las 15:00 hrs., continuando de esta manera hasta la noche a partir de las 19:00 hrs., donde mas bien suelen enfriarse los materiales en general. En el caso de las superficies de azoteas convencionales pueden conservar y liberar el calor durante más tiempo que otras estructuras construidas con elementos aligerados. Una vez que se enfrían tales componentes, como en la noche tardan más tiempo para volverse a calentar, a menos que las superficies expuestas a la radiación solar se cubran con otro tipo de cubierta como pueden ser las plantas.

De acuerdo con los resultados de la temperatura ambiente, el valor promedio máximo en verano fue de 29.8 °C y de 28.3 °C en el edificio del Hábitat y el Unitecho Vivo, respectivamente. En el periodo invernal el grado máximo de temperatura se presentó como un grupo de valores que oscilaron entre 24.8 y 25.1°C en el Hábitat, y de 24.7 °C en el Unitecho Vivo. En ambos períodos la diferencia más marcada entre sitios fue de 11:00 a las 16:00 hrs., donde los valores resultantes fueron de 1.5 y 1.3 °C en verano e invierno, respectivamente. Al calcular la temperatura exterior promedio máxima entre los sitios analizados sigue mostrando mayor diferencia en la respuesta de verano que en la de invierno, como se observa en la Tabla 2. Por ello, es probable que la respuesta térmica en el sitio con vegetación pudo ser más eficiente en verano que en invierno. En algunos estudios se reconoce que la temperatura ambiente se reduce en algunos grados por efecto de una superficie verde con respecto a una cementada (Pen y Jim, 2013). Esto nos dice que el Unitecho puede disminuir el calentamiento del aire hasta por 1.5°C.

Por otra parte, la humedad relativa del aire, en ambos sitios de estudio, fue más alta

en verano que en invierno, en donde su descenso fue de las 6:00 a las 8:00 hrs., especialmente en el período de verano. También se observa en la figura 7 que las diferencias entre ambos sitios no fueron tan amplias como en la respuesta de la temperatura ambiente. En la misma figura se observa que solo en verano la separación de los puntos mostró que la humedad del aire de UTV es mayor que la de HAB en un 4.5 %. Al mostrar una humedad similar entre los sitios de estudio puede significar que las plantas del UTV aportan un porcentaje mínimo de agua al ambiente. El tipo de superficie que presentan los sitios es un reflejo de las condiciones de humedad que pueden generar. Por ejemplo, la azotea del HAB cuya superficie está cubierta por un material prefabricado (Manto impermeable prefabricado-MIP) retiene el calor para después liberarlo y a lo largo del día secar el aire, en cambio UTV refrezca el aire mediante el vapor de agua que liberan las plantas. Sin embargo, en los resultados la humedad relativa del espacio con vegetación no fue tan diferente de la azotea convencional, en especial en la época de invierno. En un estudio sobre los cambios microclimáticos de techos verdes se observó que las plantas de un techo verde presentan mayor eficiencia de enfriamiento y humidificación durante la época de verano, cuando las temperaturas del aire son altas (Virk et al. 2015). Esto se debe a que las plantas absorben el agua a través de sus raíces y lo liberan en el aire en forma de vapor a través de sus hojas (Monteith, 1965).

En cuanto a los resultados de la temperatura superficial, su valor promedio máximo en verano fue de 58.6 °C y de 38.5 °C en el edificio del Hábitat y el Unitecho Vivo, respectivamente. En la época de invierno el grado máximo de temperatura superficial fue de 42.5 °C en el Hábitat y 30.1 °C en el Unitecho Vivo. La separación de las respuestas térmicas entre ambos sitios fue de 13.6 y 10.5 °C de las 10:00 a las 18:00 hrs en los períodos de verano e invierno, respectivamente. Esto indica que el sobrecalentamiento superficial de HAB en ambas estaciones se acentuó en verano, lo que puede representar un aumento importante para la temperatura de la azotea. Así también se observó en las temperaturas superficiales máximas promedio, donde la diferencia más alta entre HAB Y UTV fue de 21.8 °C en verano y de 6.1 °C en invierno (Tabla 3). Estos resultados muestran que, mientras una losa convencional puede retener altas concentraciones de energía

calorífica, mientras que aquella que se encuentra cubierta de vegetación puede disminuirlas. Así mismo, los resultados obtenidos por las imágenes termográficas mostraron que la falta de cubierta vegetal sobre una azotea puede presentar condiciones extremas en la temperatura superficial. Lo anterior muestra que en el sitio de HAB se detecta una alta proporción de radiación del infrarrojo, especialmente al mediodía y avanzada la tarde. En el caso de UTV, las superficies mostraron tonalidades amarillas y azules, indicando valores menores de radiación del infrarrojo. De acuerdo con López et al. (2012) la variación térmica de las hojas de las plantas puede ser muy cercana a las condiciones ambientales, así como la respuesta de la radiación del infrarrojo que estas emiten.

5.2 Proporción de calentamiento superficial en función del área.

Aunque es importante el ascenso de PCS (A) de las 6:00 a las 14:00 hrs., en HAB y UTV solo se puede decir que a las 14:00 a las 16:00 y 18:00 hrs. los valores de HAB fueron más altos que UTV, como se observa en la figura 11 A. Esto significa que en el período de verano el calentamiento fue más alto que en la azotea sin cubierta vegetal, es decir en el sitio HAB. En este periodo de 14:00 a 18:00 hrs. volvió a elevarse la respuesta de HAB con respecto a UTV, pero en menor proporción de PCS (A). Este resultado nos brinda información sobre las condiciones en que se puede calentar una azotea en relación con su área. Por esta razón se puede afirmar que las respuestas de las figuras 11A y 11B reflejan de manera similar la fluctuación de los puntos en un horario diurno. Además de que los asfaltos y concretos pueden tener importantes diferencias térmicas con otras superficies como un área verde compuesta de pasto (Yilmaz et al. 2008) también emiten grandes porciones de energía hacia la atmósfera (Roth, 2013).

De acuerdo con la figura 12 y la separación de las barras de error detectadas en la gráfica, la PCS(A) es más alta en HAB que en UTV, tanto en verano como en invierno. Aunque la diferencia de los dos sitios es aproximadamente de 100 m² se puede señalar que la disminución de la PCS(A) se debe más al efecto de la cobertura vegetal en UTV. En el

análisis de los valores que se observan en la figura 12 y variando el promedio la PCS(A), se puede afirmar que al igualar áreas en ambos sitios el efecto de enfriamiento generado por las plantas en puede incrementarse y además la disminución de la superficie en HAB, aumenta la PCS(A). En este último caso, menos m² de azotea sin naturación es probable que aumente más la PCS(A) porque se concentra más el calor en un área reducida, por el contrario, cuando se incrementa la superficie de un área naturada puede disminuir la PCS(A).

Además en la figura 13, la distribución de los puntos muestran que las azoteas en verano se calientan más que en invierno independientemente de su falta de cobertura vegetal, también se observa la extrapolación de los datos cuando las losas tienen plantas. Estos resultados indican que de acuerdo con la ecuación de la recta utilizada en la figura 12, al aumentar el área de las azoteas se incrementa la PCS(A). Esto significa que a mayor área de azotea aumenta el calentamiento de su superficie. No obstante cuando se extrapola empleando el efecto de la cobertura vegetal disminuye la PCS(A) pero es mínima. Se puede decir que este efecto de mitigación térmica de la superficie por las plantas es muy reducido, ya que una mayor densidad y tamaño de plantas podría reducir más la proporción del calentamiento superficial, al mismo tiempo disminuiría la temperatura ambiente y generaría mayores condiciones de humedad en el aire. Entonces es probable que al aumentar la densidad de vegetación en una azotea verde no solo se pueden mejorar las condiciones térmicas del ambiente si no también las bioclimáticas al interior de los edificios.

CONCLUSIONES

- ❖ En el periodo de verano, la diferencia que se obtuvo de temperatura ambiente (TA) promedio entre HAB y UTV fue de 1.5 °C y en invierno 1.3 °C, dentro del horario de las 11:00 a las 16:00 hrs. en ambos periodos.
- ❖ La humedad relativa (HR) promedio del aire fue mayor en UTV que en HAB por 4.5 % en la estación de verano en el horario de las 11:00 a las 17:00 hrs..
- ❖ La temperatura superficial fue más alta en HAB que en UTV, especialmente en verano. La diferencia de temperatura superficial entre ambos sitios de estudio fue de 13.6 y 10.5 °C en el horario de las 10:00 a las 18:00 hrs. en las estaciones de verano e invierno, respectivamente.
- ❖ La proporción de radiación del infrarrojo evaluada fue más alta en HAB y en la época de verano. Así mismo, en las imágenes termográficas se registró un valor máximo de 79.8 °C en HAB y 60.2 °C en UTV a las 14:00 hrs., respectivamente, en la estación de verano.
- ❖ La proporción de calentamiento superficial en función del área PCS(A) fue menor en invierno que en verano en ambos sitios. En esta última estación, HAB registró el valor más alto con 0.089 a las 14:00 hrs. en relación con UTV. Esto significa que PCS (A) puede aumentar en una superficie de azotea sin sistema de naturación.
- ❖ El valor de PCS (A) extrapolada, a partir de la respuesta de una azotea convencional, se eleva al aumentar las áreas en las azoteas, resultando ligeramente más bajo en las azoteas proyectadas con un sistema naturado como UTV en ambas estaciones.
- ❖ Es probable que el sistema naturado en una azotea haya mitigado las condiciones de calentamiento que una azotea convencional. Por lo tanto, la instauración de azoteas verdes en todas las azoteas de los edificios del Campus poniente de la UASLP mejoraría las condiciones ambientales. Sin embargo para lograrlo se requieren mayor eficiencia de riego en el mantenimiento de tales sistemas, así como la sobrevivencia de más plantas que representen más beneficios microclimáticos.

REFERENCIAS

- Aguillón Robles Jorge, (2007). "Atlas Bioclimático para el Estado de San Luis Potosí", Municipio de San Luis Potosí, ESDEPED, Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310.
- Akbari, H. (2002). Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environ Pollut* 116(1),119-126.
- Akbari, H., Shea Rose, L., & Taha, H. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and Urban Planning*, 63(1), 1-14.
- AMENA, (2010). Asociación Mexicana para la Naturación de Azoteas, A. C. Introducción a los Sistemas Constructivos y Normatividad para la Naturación de Azoteas, p.33. Congreso Mundial de Azoteas Verdes 2010. México, D.F
- Amuzurrutia, V, D., Aguirre, S, C., Sánchez, D, G. (2015). ¿Hacia dónde crecerá la ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009? Artículos. EURE. Vol. 41. No 124. Pp. 113-137.
- Arabi, R. S., Amir; Khodabakhshi, Sahar. (2014). Benefits of green roofs; a review paper. [Review paper]. *Elixir International Journal*, 68, 22222-22228.
- Arabi, R., SHAHIdAn, M. F., Kamal, M. M., Jaafar, M. F. Z. B., & Rakhshandehroo, M. (2015). Mitigating Urban Heat Island Through Green Roofs. *Current World Environment*, 10 (Special Issue 1 (2015)), 918-927.
- Arnfield, A.J.(1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*.14, 2, 117-131
- Arnfield A. J. (2003). Two decades of urban climate research, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. 23, 1-26.
- Azevedo Salomao, Eugenia María; Castrejón Paniagua, Angélica; (2013). Urbanismo moderno en México: el Plan Regulador de San Luis Potosí en los años sesenta y la

- creación de lugares en los años setenta. DEARQ - Revista de Arquitectura / Journal of Architecture, Julio, 76-92.
- De la Fuente, Elba B y Suárez, Susana, A. (2008). Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral*. Asociación Argentina de Ecología 18 (3) 239-252.
- Barboza Lizano, Óscar. (2013). CALENTAMIENTO GLOBAL : “LA MÁXIMA EXPRESIÓN DE LA CIVILIZACIÓN PETROFÓSIL ” *Revista del CESLA*, núm. 16, pp. 35-68
- Bazant S, Jan. (2009). Periferias urbana. *Expansión urbana incontrolada de bajo ingreso y su impacto en el medio ambiente*, México: Editorial Trillas.
- Bazant s, Jan. (2010). *Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana*. *Espacio Abierto [online]*. 2010, vol.19, n.3, pp. 475-504. ISSN 1315-0006.
- Bell, M., Goldberg, R., Hogrefe, C., Kinney, P.L., Knowlton, K., Lynn, B., Rosenthal, J., Rosenzweig, C., Patz, J., (2007). Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities. *Clim. Change*, 82, 61–76.
- Bousse, Y. S. (2009). *Mitigating the urban heat island effect with an intensive green roof during summer in Reading, UK*. *Dissertação de Mestrado*, University of Reading.
- Bouyer, J., Musy, M., Huang, Y., & Athamena, K. (2009). *Mitigating urban heat island effect by urban design: forms and materials*. Paper presented at the Proceedings of the 5th urban research symposium, cities and climate change: responding to an urgent agenda, Marseille.
- Braaker, S., Ghazoul, J., Obrist, M.K., and Moretti, M.(2014). *Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs*. *Ecology* 95, 1010–1021.
- Brom, J. (2001). *Esbozo de Historia Universal*, Ed. Grijalbo, México.
- Brown, P. (2014). *Basics of Evaporation and Evapotranspiration*. The University of Arizona - College of Agriculture and Life Sciences - Cooperative Extension.
- Caballero, R, E. (2004). *Microclimas urbanos: La importancia de los materiales*. En: García Codron, J.C.; Diego Liaño, C.; Fdez. de Arróyabe Hernández, P.; Garmendia Pedraja, C. y Rasilla Álvarez, D. (Eds.), *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, No. 4, Santander, 571-582 pp.

- Camous, R., & Wattson, D. (1986). El hábitat bioclimático: De la concepción a la construcción. México: G. Gili.
- Carabias, J. L. (1988). DETERIORO AMBIENTAL EN MÉXICO. Los Sistemas Urbanos. Ciencia, Revista de difusión, 1988. Facultad de Ciencias UNAM. Pp. 13-19. En línea:
- Carbonell Padrino, María Victoria; Martínez Ramírez, Elvira; Flórez García, Mercedes; Maqueda González, María Rosario; (2005). Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, . 14-18.
- Cedeño Valdiviezo, A. (2010). Materiales bioclimáticos. Revista de Arquitectura, 12, 100-110.
- Cohen, B. (2006). Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technology in Society* 28 (2006) 63–80
- Cunha, J. M. P y Rodríguez, V, J. (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. *Revista Latinoamericana de Población*, Enero-Diciembre, 27-64.
- Connors, J. P., Galletti, C. S. y Chow, W. T. (2013). Efectos de isla de calor urbano y configuración del paisaje: evaluar la relación entre las características del paisaje y temperatura de la superficie en Phoenix, Arizona de la tierra. *Ecología del paisaje*, 28 (2), 271-283.
- Chaves, P, J. (2004). «Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial». *Revista de Historia* 17. ISSN 0213-375X
- Childe, V. Gordon (1954) «Las primeras formas de la sociedad.» (En [Cantor et alii , 1954: 3857].)
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76.
- Elmqvist, T., H. Setälä, S. N. Handel, S. van der Ploeg, J. Aronson, J. N. Blignaut, E. Gómez-Baggethun, D. J. Nowak, J. Kronenberg, and R. de Groot. (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14,101–108
- EULEB European high quality Low Energy Buildings (2007). “Final Report Partly funded by Intelligent Energy Europe” Project-No.: EIE-2003-172 EULEB.

- Fariña Tojo, J. (1990). Clima, territorio y urbanismo. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid.
- Fernández García, Felipe, (2009). CIUDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO: ASPECTOS GENERALES Y APLICACIÓN AL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID. Investigaciones Geográficas (Esp), Sin mes, 173-180.
- Foley, J. A., N. Ramankutty, K. A. Brauman, E. S. Cassidy, J. S. Gerber, M. Johnston, N. D. Mueller, C. O'Connell, D. K. Ray, P. C. West, C. Balzer, E. M. Bennett, S. R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockström, J. Sheehan, S. Siebert, D. Tilman, and D. P. M. Zaks. (2014). Solutions for a cultivated planet. 2011. Nature 478: 337-342.
- Gartland, L. (2008). Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas, Earthscan Press, London, UK.
- Gartland, L. (2011). Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas: Routledge.
- Garza, Néstor. (2009). DILEMA ECONÓMICO - AMBIENTAL DEL URBANISMO EN CIUDADES LATINOAMERICANAS. Investigación & Desarrollo, 288-327.
- Getter, K. L. y Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. HortScience, 41(5), 1276-1285.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities, Science 319, 756. DOI:10.1126/science.1150195
- Güneralp, B y Seto, K, C. (2008). Impactos ambientales del crecimiento urbano desde una perspectiva integrada de la dinámica: un estudio de caso de Shenzhen, sur de China. El cambio ambiental global. V 18, número 4, octubre de 2008, Pp. 720-735
- HALL, Peter. (1975) «The origins: urban growth from 1800 to 1940» en Urban and Regional Planning, London 1975, ps. 21/22, 22/23, 32.
- Hallegatte, Stéphane, Fanny Henriët and Jan Corfee-Morlot. (2008). "The Economics of Climate Change Impacts and Policy Benefits at City Scale: A Conceptual Framework",

- Environment Working Paper No. 4, OECD, Paris.
- Hartwell, R. M. (S.F). L A REVOLUCIÓN INDUSTRIAL EN INGLATERRA Y SUS CONSECUENCIAS PARA LOS POBRES.
- Hobsbawm, E. (1997). La era de la Revolución 1789-1848, (Ed. Grijalbo, Barcelona, 1997).
- Hunt, Alistair and Paul Watkiss. (2007). “Literature Review on Climate Change Impacts on Urban City Centres: Initial Findings”, OECD Environment Directorate Working Paper, OECD, Paris.
- IEA (International Energy Agency) (2008). *Energy Technology Perspectives*, OECD/IEA, Paris.
- _ (2008a). *World Energy Outlook 2008*, OECD/IEA, Paris.
- Ignatius M, Wong NH, Jusuf SK (2015) Urban microclimate analysis with consideration of local ambient temperature, external heat gain, urban ventilation, and outdoor thermal comfort in the tropics. *Sustain Cities Soc* 19:121–135.
- IPCC, Climate Change. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (pp. 2216).
- INEGI. Censos de Población y Vivienda (1950 – 2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI, (2013). *Marco Geoestadístico Nacional 2013, versión 6*. Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí, 2015.
- Jim, C.Y.; He, H.M. (2010). Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecol. Eng.* 36, 1507–1519.
- Jim, C.Y., Peng, L.L.H. (2012). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban For. Urban Green.* 11, 73–85.
- Jiménez, L, A; Ortiz A, C; y Gerritsen, Peter R. W. (2005). Urbanización y problemática socioambiental en la costa sur de Jalisco, México. Una aproximación. *Región y Sociedad*, XVII No. 33. Mayo-Agosto, 107-132.
- Johnson, D.P., Wilson, J.S., 2009. The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: the case of heat-related deaths in Philadelphia. *Appl. Geography* 29, 419–434.

- Kamal-Chaoui, Lamia and Alexis Robert (eds.) (2009). "Competitive Cities and Climate Change", OECD Regional Development Working Papers N° 2, 2009, OECD publishing, © OECD.
- Knowlton, K., Lynn, B., Goldberg, R.A., Rosenzweig, C., Hogrefe, C., Rosenthal, J., Kinney, P.L., (2007). Projecting heat-related mortality impacts under a changing climate in the New York City region. *Am. J. Public Health* 97 (11), 2028–2034.
- Krüger, E., & Emmanuel, R. (2013). Accounting for atmospheric stability conditions in urban heat island studies: The case of Glasgow, UK. *Landscape and Urban Planning*, 117, 112-121.
- Kumar, Vinod & Mahall, A.M. (2016). Green Roofs for Energy Conservation and Sustainable Development: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*. 11- 4. pp 2776-2780.
- Landsberg, E.H. (1981). *The Urban Climate*, Academic Press, Maryland.
- Lee, D.O. (1984), "Urban climates," *Progress in Physical Geography* 8(1), 1–31.
- Li, W.C. y Yeung, K.K.A. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*.3, 127–134
- López A., F.D. Molina-Aiz, D.L. Valera y A. Peña. (2012). Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*. 137: 49-58.
- López G. (1991). *El clima urbano en Madrid: La isla de calor*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- López, V., Plata, W. (2008). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 68, 2009, pp. 85-101*
- López, L, R. (1993). *Ciudad y urbanismo a finales del siglo xx*. Universitat de Valencia Servei de Publicacions.
- Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the mesoscale impact of cities. *Theoretical*

- and Applied Climatology, 84(1-3), 35-45.
- Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejidad, R., Avner, P., Bonhomme, M. (2014). Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate* 10, 407–429.
- Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the Rayman model. *Int. J. Biometeorol.*, 54, 131–139.
- Mazria, Edward. (1983). *El Libro de la Energía Solar Pasiva*. Ed. Gili.
- Melillo, J. M., T. C. Richmond, and G.W. Yohe, Eds. (2014). “Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment.” U.S. Global Change Research Program.
- Meulenert P., Ángel R.; Espinosa M., Martha L.; García C., Faustino O.; Alcalá G., Jaime; Ramírez S., Hermes U.; Arellano C., Jesús; García G., Mario E.; De la Torre V., Odila; (2006). Influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *e-Gnosis*, .
- Minke, G. (2004). *Sustrato. Techos Verdes, Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Edit. Fin de Siglo. Montevideo, Uruguay. p.9
- Mirzaei, P. A., & Haghghat, F. (2010). Approaches to study urban heat island–abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192-2201.
- Mitchell, W J; (2007). *Ciudades inteligentes*. UOC Papers. Revista sobre la sociedad del conocimiento.
- Monteith, J. (1965). *Evaporation and environment*. Paper presented at the Symp. Soc. Exp. Biol.
- Mumford, L. (1956). *The natural history of urbanization*. *Boletín Ciudades para un Futuro más Sostenible*.
- NADF-013-RNAT-2007. *Norma Ambiental para el Distrito Federal*, Gaceta Oficial del Distrito Federal. Que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. Décima séptima época, 24 de diciembre de 2008, No. 491, 33.

- Nicholson, L, D. (2003). *Green Cities: And why We Need Them*. New Economics Foundation.
- Nikolopoulou, M. and STEEMERS, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, *Energy and Buildings*, 2003, Vol. 35, No.1.
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis* 3(2), 67-73.
- OECD, (2009). Kamal-Chaoui, Lamia and Alexis Robert (eds.) (2009), "Competitive Cities and Climate Change", *OECD Regional Development Working Papers N° 2, 2009*, OECD publishing, © OECD.
- OECD (2006), *Competitive Cities in the Global Economy*, OECD, Paris.
- OECD (2008) *Competitive Cities and Climate Change: OECD Conference Proceedings*, Milan, Italy, October 9-10, 2008, OECD, Paris.
- Oke, T.R. (1982). "The energetic basis of the urban heat island." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108: 1–24.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*, Methuen. London,.2nd edn.
- Oke, T.R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 2, 4, 471-508
- Okwen, R., Pu, R., & Cunningham, J. (2011). Remote sensing of temperature variations around major power plants as point sources of heat. *International journal of remote sensing*, 32(13), 3791-3805.
- ONU (2004), *Executive Summary. World Urbanization Prospects: The 2003 Revision*, Naciones Unidas, División de Población, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Nueva York.
- Oyon, J. L. (1992) *Transporte caro y crecimiento urbano. El tráfico tranviario en Barcelona, 1872-1914*, *Ciudad y Territorio*, 94,107-123.
- Papadakis, G., Tsamis, P., Kyritsis, S. (2001). An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy Build.* 33, 831–836.
- Pataki DE, Carreiro MM, Cherrier J, Grulke NE, Jennings V, Pincetl S, Pouyat RV, Whitlow TH, Zipperer WC. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Front Ecol Environ*, 9,27-36.

- Peng, L. L., & Jim, C. Y. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598-618.
- Peña Chacón, M. (2003). La transversalidad del derecho ambiental y su influencia en el instituto de la propiedad y otros derechos reales”, *Revista*
- Prashad, L. (2014). Isla de calor urbano. *Enciclopedia de la teledetección*, 878-881.
- Priyadarsini, R., Hien, W. N., & David, C. K. W. (2008). Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar energy*, 82(8), 727-745.
- Quattrochi, D. A., Luvall, J.C., Rickman, D.L., Estes, M.G., Laymon, C.A., and Howell, B.F. 2000. “A Decision Support Information System for Urban Landscape Management Using Thermal Infrared Data.” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66:1195–1207.
- Radhi, Sharples, S., Fikry, f el. y H. (2013). Impactos de la urbanización sobre el comportamiento térmico de nuevos entornos construidos: un estudio de alcance de la isla de calor urbano en Bahrein. *Paisaje y Urbanismo*, 113, 47-61.
- Ramos-Palacios CR. (2012). Balance energético y evapotranspirativo en bosque templado y pastizal. Editorial Académica Española. Lambert Academic Publishing, GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str, Saarbrücken, Germany.
- Rosenzweig, C., Major, D.C., Demong, K., Stanton, C., Horton, R., Stults, M., 2007. Managing climate change risks in New York City’s water system: assessment and adaptation planning. *Mitigation Adapt. Strateg. Global Change* 12, 1391–1409
- Roth M. (2013). Urban heat islands. In H. J. S. Fernando (ed.). *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, Vol. 2. Press/Taylor & Francis Group, LLC (143-159).
- Sailor, D. J. (2006). Mitigation of urban heat islands—Recent progress and future prospects. Paper presented at the Paper presented on american meteorological society 6th symposium on the urban environment and forum on managing our physical and natural resources.
- Sandino, H., Montiel, D. (2012). La Termodinámica como origen de la revolución industrial

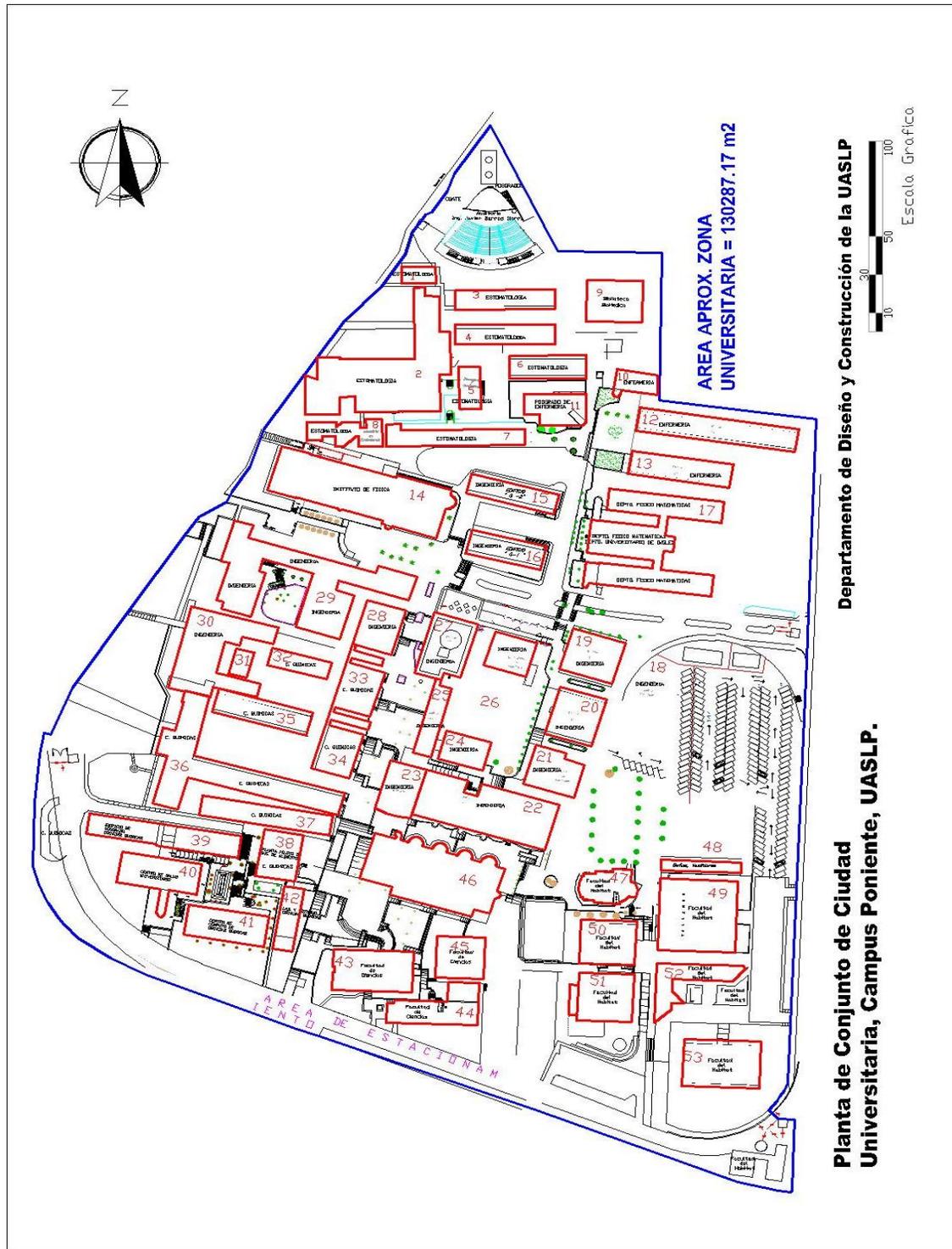
- del siglo XVIII. Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 6, No. 4, Dec. 2012. PACS: 50.70.-a, 01.40.-d, 01.30.Os, ISSN 1870-9095.
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. D. N. (2001). *Energy and climate in the urban built environment*: Routledge.
- Santamouris, M., Paraponiaris, K. and Mihalakakou, G. (2007). Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece. *Climate Change*. 2007, Vol. 80, pp. 265-276.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
- Santillán, M. L. (2013). Asentamientos irregulares deterioran el ambiente. *Actividades, Ambiente y Naturaleza*. DGDC-UNAM.
- Saynes Santillán, V., J. D. Etchevers Barra, F. Paz Pellat y L. O. Alvarado Cárdenas. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana* 34: 83-96.
- SEDEMA, (2008). Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Cambio climático en la ciudad de México. Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012.[Presentación en PowerPoint en línea]
- Seto, KC., Fragkias, M., Güneralp, B., Reilly, MK. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PLoS ONE* 6(8): e23777.
- Shishegar, N., 2014. The Impact of Green Areas on Mitigating Urban Heat Island Effect: A Review. *The International Journal of Environmental Sustainability* 9(1), 119-130.
- Steenefeld, G. J., Koopmans S., Heusinkveld B. G, Van Hove L. W. A. and Holtslag A. A. M (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort of variable size and urban morphology in the Netherlands. *J. Geophys. Res.*, 116
- Sturman, A. and Tapper N. (2005). *The Weather and Climate of Australia and New Zealand*, 2nd edition, Oxford University Press, Melbourne, 541 pp. (ISBN 9 78019558 4660, ISBN 0 19 558466 X).
- Suárez, M y Delgado, J. (2006). La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un

- escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020. Estudios Demográficos y Urbanos, Vol. 22, Núm. I (64), pp. 101-142
- Susca, T., Gaffin, S., & Dell’Osso, G. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8), 2119-2126.
- Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M., & Soulakellis, N. (2008). On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11), 2846-2856.
- Taha, H., H, Akbari and A, Rosenfeld. (1988). Residential cooling loads and the urban heat island: the effects of albedo, *Build. Environ.* 23 271.
- Taha, H., H, Akbari and A, Rosenfeld. (1989). Vegetation microclimate measurements: the Davis project, Lawrence Berkeley Lab. Rep. 24593
- Taha, H., Akbari and A. Rosenfeld. (1991). Heat island and oasis effects of vegetative canopies: Micrometeorological field measurements, *Theor. Appl Climat.* 44. 123.
- Taha, H., D. Sailor and H. Akbari. (1992). High albedo materials for reducing cooling energy use, Lawrence Berkeley Lab. Rep. 31721 IJC-350, Berkeley, CA.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, (2), 99-103.
- United Nations (2008), *State of the World’s Cities 2008/2009: Harmonious Cities*,
- United Nations, (2014). Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: Published by the United Nations. ISB N 978 - 92-1-151517- 6*
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2008. “Urban Heat Island Basics, in *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies.*” United States.
- U.S. Geological Survey. (2016). *The Water Cycle: Evapotranspiration.*
- Villanueva, J; Ranfla, A; Quintanilla, A, L. (2012). *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. Información Tecnológica Vol. 24(1), 15-24*
- Virk G., A. Jansz, A. Mavrogianni, A. Mylona, J. Stocker y M. Davies. (2015). Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical

- office building. *Energy and Buildings*, 88: 214-228.
- Voogt, J.A., and T.R. Oke. (2003). Thermal remote sensing of urban areas. *Remote Sensing of Environment* 86: 370–384.
- Wong, N., Kardinal Jusuf, S., Aung La Win, A., Kyaw Thu, H., Syatia Negara, T., & Xuchao, W. (2007). Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, 42(8), 2949-2970.
- Wong, E. (2005). Green roofs and the Environmental Protection Agency's heat island reduction initiative, p. 32–44. In Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.
- Yu, C., & Hien, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38(2), 105-120.
- Younga, Thomas., Duncan D., Cameron, Jeff Sorril.I, Tim, Edwardsc., Gareth, K. Phoenix. (2014). Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 507–516.
- Zhao, M., Tabares-Velasco, P. C., Srebric, J., Komarneni, S., & Berghage, R. (2014). Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment*, 78, 1

ANEXOS

Anexo 1. Planta de Conjunto de Ciudad Universitaria, Campus Poniente, UASLP.



Anexo 2. Planta Arquitectónica de Ciudad Universitaria, Campus Poniente, UASLP

