

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“DETECCIÓN DE NÚCLEOS DE ISLAS DE CALOR
EN LA CIUDAD DE AREQUIPA”**

Presentada por:

Patricia Porras Vásquez

Trabajo Monográfico para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima – Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DETECCIÓN DE NÚCLEOS DE ISLAS DE CALOR
EN LA CIUDAD DE AREQUIPA”**

Presentada por:

Patricia Porras Vásquez

Trabajo Monográfico para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y Aprobada por el siguiente Jurado:

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
PRESIDENTE

M. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Calle Montes
MIEMBRO

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
ASESOR

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION	3
Objetivos de la investigación	3
III. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Áreas Urbanas	5
3.2. Ecosistema Urbano.....	6
3.3. Crecimiento Urbano	7
3.4. Clima Urbano	10
3.4.1. Características urbanas que interfieren en el clima	11
3.4.2. Atmósfera Urbana	12
3.5. Isla de calor	15
3.5.1. Formación de las islas de calor.....	15
3.5.2. Impactos de la isla de calor urbana	22
3.5.3. Detección de la isla de calor.....	24
IV. METODOLOGÍA	26
4.1. Área de estudio.....	26
Aspecto geográfico.....	26
Aspecto demográfico.....	28
Aspecto económico y social.....	29
4.2. Materiales y software	30
4.2.1. Materiales	30
o Imágenes de satélite	30
o Información en superficie	30
4.2.2. Software	31
4.3. Metodología	31
4.3.1. Recolección y selección de imágenes LandSat	31
4.3.2. Pre procesamiento de imágenes LandSat	31
4.3.3. Identificación de Islas de Calor Urbano	36
V. RESULTADOS	37

VI.	CONCLUSIONES.....	42
VII.	SUGERENCIAS.....	43
VIII.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	44
IX.	ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la población mundial – urbana y rural.....	8
Figura 2. Evolución de la población urbana y rural para América Latina.	9
Figura 3. Porcentaje de la población que reside en áreas urbanas.	10
Figura 4. Factores que afectan al clima urbano.....	11
Figura 5. Composición de la atmósfera rural y urbana.	13
Figura 6. Formación del ozono troposférico.	13
Figura 7. Formación del ácido sulfúrico.	14
Figura 8. Componentes de la atmósfera urbana.	15
Figura 9. Variación de la temperatura superficial y atmosférica	16
Figura 10. Evolución diurna de la isla de calor.....	17
Figura 11. Fluctuación de la temperatura de diferentes materiales de superficie durante un día.....	18
Figura 12. Ubicación geográfica de la ciudad de Arequipa.	27
Figura 13. Esquema de metodología del estudio.....	32
Figura 14. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 06-11-2011 a las 10:00 am hora local.	38
Figura 15. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 27-11-2013 a las 10:00 am hora local.	40
Figura 16. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 03-11-2016 a las 10:00 am hora local.	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las ciudades según número de habitantes.	6
Tabla 2. Impactos ambientales de la urbanización.....	23
Tabla 3. Distritos que conforman la ciudad de Arequipa.....	28
Tabla 4. Cantidad de habitantes en los distritos de la ciudad de Arequipa.	28
Tabla 5. Indicadores económicos de la ciudad de Arequipa.	29
Tabla 6. PBI y PEA por sectores económicos.....	29
Tabla 7. Imágenes Landsat utilizadas en el estudio	30
Tabla 8. Estaciones meteorológicas de la red de monitoreo del SENAMHI	30
Tabla 9. Estimación de la emisividad del suelo en función del NDVI.....	34
Tabla 10. Estimación de la temperatura media de la atmósfera.	35
Tabla 11. Categorización de la Intensidad de ICU.....	36

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos de temperatura en superficie y transmitancia atmosférica.	47
Anexo 2. Valores de TSS del área urbanizada específicamente de concreto y asfalto.	47
Anexo 3. Mapa topográfico de la ciudad de Arequipa. Fuente: Mapa topográfico mundial	48
Anexo 4. Mapa de calles de la ciudad de Arequipa. Fuente: Open street map (ESRI).	49

RESUMEN

En el presente estudio se detectó las Islas de Calor urbano en la ciudad de Arequipa (la segunda ciudad más grande del país) por los efectos de cambios en el clima a causa del proceso de urbanización. Se utilizó tres imágenes (landsat 5 y landsat 8) representativas de los años 2011, 2013 y 2016, cuya resolución original es de 100 a 120 metros por pixel de la banda térmica (dependiendo del tipo sensor) y para el cálculo de la transmitancia de la atmósfera se aprovechó tres estaciones en superficie de la red de estaciones del SENAMHI, las estaciones convencionales de Huasacache (2242 msnm), La Pampilla (2400 msnm) y Chiguata (2943 msnm). Lo que se desea observar es como en el tiempo la intensidad de Isla de Calor Urbano (ICU) ha ido evolucionando en dicha ciudad. Producto del análisis se encontró un incremento de ICU a través de los años, tanto de intensidad como de extensión, al extremo norte y oriente de la ciudad de Arequipa. Este trabajo es una herramienta útil que puede contribuir en temas relacionados a la planificación urbana, al confort térmico, contaminación atmosférica, y así en distintos temas que ayuden mejorar el estado de las ciudades.

Palabras claves: Sensoramiento remoto, Isla de Calor Urbano (ICU), emisividad, clima urbano.

ABSTRACT

This research is about the satellite detection of urban heat island in the city of Arequipa (the second largest city in the country), due to effects of changes in the climate because of urbanization process. Three representative images (landsat 5 and landsat 8) were used for the years 2011, 2013 and 2016, whose original resolution is 100 to 120 meters per pixel of the thermal band (depending on the sensor type). For the calculation of the transmittance of the atmosphere three surface stations of the network of stations of the SENAMHI were used, the conventional stations of Huasacache (2242 masl), Pampilla (2400 masl) and Chiguata (2943 masl). What it is wanted to observe throughout the years is how the intensity of Island of Urban Heat (ICU) has been evolving in that city. As a result of the analysis was found an increase of ICU over the years, both intensity and extension, to the north and east of the city of Arequipa. This work is a useful tool that can contribute on issues related to urban planning, thermal comfort, air pollution, and so on various topics that help improve the health of cities.

Keywords: Remote sensing, urban heat island, emissivity, urban climate.

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización ha forzado un cambio en la distribución energética, modificando el clima de las ciudades, creando un efecto muy estudiado y que se va tratar en el presente trabajo denominado Islas de Calor Urbano (Moreno, 1999).

Gran parte de este proceso de urbanización se traduce en la sustitución de áreas verdes por materiales como el asfalto, hormigón, entre otros, que se caracterizan por tener un menor albedo y alta emisividad, produciendo una mayor absorción del calor y mayor calentamiento. Este proceso de urbanización constituye una de las formas espaciales concebidas por la sociedad humana que más altera el paisaje, principalmente por la falta de planeamiento adecuado de ocupación, según Coelho (2003).

Las islas de calor urbano tiene impactos locales en el clima, alterando los patrones del viento, estimulando el desarrollo de las nubes y la niebla, aumentando los eventos de tormentas eléctricas y la tasa de precipitación, Liu et al. (2011). Sus efectos más directos son sentidos por la población a través de la alteración del confort térmico, de la calidad del aire, además de otras manifestaciones, deteriorando la calidad de vida de los habitantes (Mendoza y DANNI-OLIVERIA, 2007)

De acuerdo con Brandao (2011), el fenómeno de “Isla de calor” es uno de los más significativos en el clima urbano y su intensidad depende de las condiciones micro y mesoclimáticas locales como la topografía, la geometría de las edificaciones, el albedo de los materiales constituyentes, la impermeabilidad del suelo, la concentración de áreas verdes, entre otros. En esa perspectiva, la información del uso y cobertura de tierra juntamente con datos de temperatura de superficie, derivadas de técnicas de sensoramiento remoto orbital, constituyen parámetros relevantes en el que se trata los estudios del clima de una determinada unidad espacial (MONTEIRO, 1991).

Rao (1972) fue el primero en demostrar que las áreas urbanas pueden ser identificadas por medio de análisis de datos en la banda del infrarrojo termal adquiridos por un satélite.

Investigadores como Qin et al (2001), Coelho e Correa (2013), Nascimento (2011), Weng (2010), Jensen (2009), Liu (2006), Weng et al. (2004), Oke (2003), Streuker (2002), Mendoza (1995), Lombardo (1985), entre otros, también usaron sistemas de sensoramiento remoto infrarrojo termal para documentar el efecto de islas de calor urbano, así como extraer información de temperatura de la superficie de distintos materiales.

En ese contexto, el presente estudio tiene como objetivo identificar los núcleos de islas de calor de la Ciudad de Arequipa, que es la segunda ciudad más poblada e industrializada de nuestro país, aplicando la técnica propuesta por Qin et al (2001), conocida como Mono Window, basado en la ecuación de transferencia de radiación térmica, utilizando técnicas de teledetección.

II. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La ciudad de Arequipa es una de las cuatro principales ciudades del país, y es el principal eje de la macro región del sur. Esta ciudad está atravesando un crecimiento urbano rápido, desordenado y no planificado, existe la ocupación ilegal e informal del suelo eriazo y de áreas agrícolas, centralismo y concentración de actividades de intercambio en el área central de la ciudad, como en áreas aledañas a los distritos de Yanahuara, Cayma, Cerro Colorado y José Luis Bustamante y Rivero, conformando de tal manera una zona central con mucha influencia metropolitana. Más del 75% de la población arequipeña a migrado a la ciudad de Arequipa, actualmente la dotación de áreas verdes es 3 m²/hab (siendo lo ideal 9 m²/hab según la OMM), existe un incremento agravado de desertificación en la ciudad debido a la reducción de zonas de compensación ambiental y la disminución de áreas verdes. Por tanto, debido a estas razones, al impacto que genera la conformación de una ciudad en el clima y en la salud de los ciudadanos, es interés de este proyecto de tesis evaluar e identificar las islas de calor urbano mediante la teledetección, una herramienta que ha avanzado muchos en estos tiempos, permitiendo de tal modo tomar acciones de planeación urbana que posibiliten la mitigación y control de este fenómeno y mejoramiento de las condiciones de uso del suelo.

Objetivos de la investigación

Objetivo Principal

- ✓ Identificación de islas de calor en la ciudad de Arequipa mediante imágenes LandSat.

Objetivos Secundarios

- ✓ Recopilación de imágenes Landsat que enfoquen el área de estudio.
- ✓ Selección de las mejores imágenes que muestren el área de estudio con mayor nitidez y poca o nula cobertura nubosa.
- ✓ Identificación de las islas de calor urbano en el área de estudio.
- ✓ Determinar la intensidad del núcleo urbano detectado.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Áreas Urbanas

Existen diversas definiciones sobre las áreas urbanas o urbes, conocidas comúnmente como “ciudades”. Por ejemplo, el norteamericano Arousseau (1921) define a los sectores urbanos como a las “grandes masas concentradas que no se interesan, al menos en forma inmediata, por la obtención de materias primas, alimenticias, textiles o de confort en general, sino que están vinculadas a los transportes, a las industrias, al comercio, a la instrucción de la población, a la administración del Estado o simplemente a vivir en la ciudad.” Mientras tanto para Richthofen (1908) una ciudad es “un agrupamiento cuyos medios de existencia normales consisten en la concentración de formas de trabajo que no están consagradas a la agricultura, sino particularmente al comercio y a la industria.”

En el presente trabajo de investigación se definirá como ciudad, aquel espacio determinado por límites políticos y/o geográficos en el cual se ha modificado la superficie natural, casi en su totalidad, por la intervención del hombre, creando áreas de altas y/o bajas densidades de edificaciones, en las cuales un conjunto de personas realizan actividades comerciales, económicas, industriales, educativas y de recreación.

Las ciudades se pueden clasificar según el número de habitantes (magnitud demográfica), según el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (Tabla 1), siguiendo las siguientes consideraciones:

- a. **Metrópoli:** Cuando cuente con un millón de habitantes como mínimo y se extienda en un espacio relativamente compacto, con una densidad media mínima de 2.000 habitantes por kilómetro cuadrado y con una estructura monocéntrica.

- b. Ciudades Intermedias: Las ciudades son consideradas intermedias básicamente por el rol que desempeñan en los diferentes flujos político, económico, cultural, que se dan en el territorio, es decir que sirven de intermediación entre los grandes centros de decisión y las amplias áreas rurales.
- c. Centro Poblado: Se caracteriza por tener una población no mayor de 2000 habitantes.

Tabla 1. Clasificación de las ciudades según número de habitantes.

CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES	MAGNITUD DEMOGRÁFICA	
	Según tamaño de población en el Sistema Urbano Nacional*	Según población de referencia que alcanzaría en el año 2015 **
Metrópolis nacional	Más de 1 000 000	Más de 10 000 000 a más
Metrópolis regional	500 000 a 1 000 000	1 000 000 a más
Ciudad mayor	---	250 000 a 999 999
Ciudad intermedia	5 000 a 20 000	100 000 a 249 999
Ciudad menor	20 000 a 5 000	20 000 a 99 999
Centro poblado (de ámbito rural)	No mayor a 2 000 habitantes	

FUENTE: MVCS

* Plan Nacional de Desarrollo Urbano 2006-2015 (Año 2005)

**Situación de los barrios Urbano Marginales en el Perú (Año 2004)

3.2.Ecosistema Urbano

Las ciudades pueden ser entendidas como ecosistemas, considerándose como ecosistema al conjunto holístico e integrado de elementos bióticos y físicos (Tansley, 1935; citado por Castro, 2002).

El ecosistema urbano considera la interacción entre el hombre y el medio ambiente en áreas urbanas, la cual se manifiesta en flujos de materia energía y residuos (Castro 2002).

La definición de ecosistema urbano incluye elementos de carácter social y de construcción, además de los elementos físicos y bióticos, que interactúan entre sí. Si bien la infraestructura, edificaciones y superficies artificiales son elementos físicos, éstas se consideran como elementos de construcción para hacer referencia que son de carácter antropogénico. El ecosistema urbano se caracteriza principalmente por su constante dinamismo en la transformación de su morfología, entendiéndose como morfología a la estructura física de la ciudad (Castro, 2002; Cadenasso y Pickett, 2008).

3.3.Crecimiento Urbano

Las ciudades, son vistas como un sistema dinámico, se encuentran en constante cambio y crecimiento, transformando con el tiempo, mayor área de superficie natural en área urbana.

El crecimiento urbano no implica sólo un incremento numérico, sino que también trae consigo una serie de cambios y movimientos asociados a los esfuerzos de cada individuo por encontrar su lugar en la inmensa complejidad de la vida urbana. El desarrollo de nuevas áreas, la multiplicación de ocupaciones y profesiones, el aumento de los valores inmobiliarios que la expansión urbana conlleva, son aspectos implicados en el proceso de crecimiento de la ciudad y pueden ser evaluados en términos de un cambio de posición de los individuos en relación a los otros y a la comunidad en su conjunto (Elgueta, 2006).

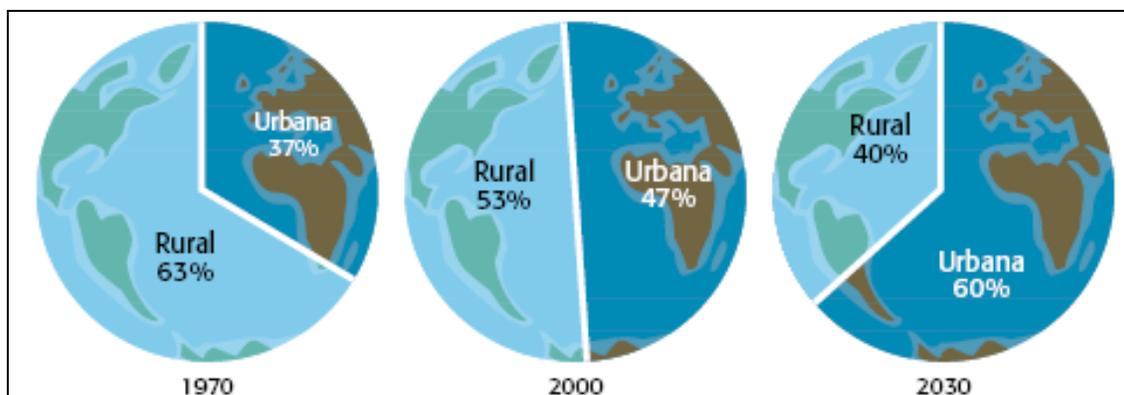


Figura 1. Distribución de la población mundial – urbana y rural.

FUENTE: UN-HABITAT; citado por REDLAC (2006).

El crecimiento de las ciudades en todo el mundo ha ido aumentando significativamente en los últimos años (Figura 1). En los años 1900, a nivel mundial, la población rural representaba más del 30% de la población total, sin embargo se estima, de acuerdo al crecimiento constante de las áreas urbanas, que en los próximos años la población urbana represente más del 50% de la población mundial.

En América Latina, el crecimiento demográfico urbano y rural sigue la misma tendencia mundial (Figura 2), donde más de la mitad de la población vive en ciudades. El rápido crecimiento de urbanización trae como consecuencia que la región, predominantemente urbana, no presente las condiciones básicas para atender a la concentración tan alta de población en sus ciudades (REDLAC 2008).

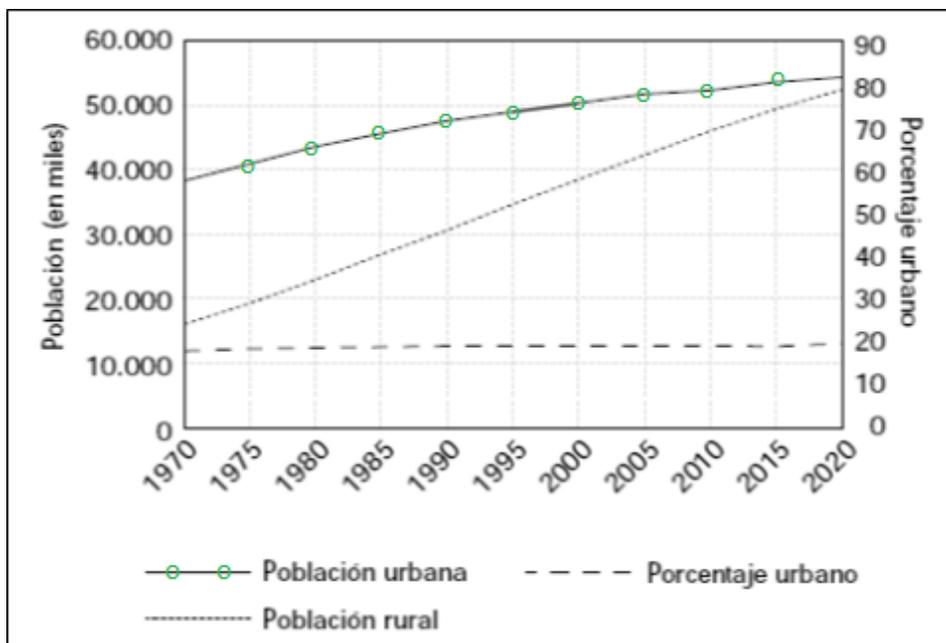


Figura 2. Evolución de la población urbana y rural para América Latina.

FUENTE: CEPAL, División de Población – Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE); citado por REDLAC, (2006).

Según las Naciones Unidas, citado por Antequera (2007), la urbanización en los países menos desarrollados tiene como principales causas la urbanización de los asentamientos humanos, la migración de personas provenientes de otras zonas que buscan mejorar sus condiciones económicas y el aumento incontrolado de la población dentro de la ciudad.

América Latina y El Caribe son las regiones con mayor índice de urbanización, teniendo al 77% de su población viviendo en áreas urbanas y estimándose que para el año 2030 el 84% de dicha población resida en las ciudades, ocupando así el segundo lugar después de Norteamérica (Naciones Unidas; citado por Antequera, 2007). Entre los años 1950 y 1972, América Latina sufrió el más grande incremento de urbanización en la historia, aumentó del 42% a 61% en 22 años, y que según Ledo, citado por Antequera (2007), se debió a la migración por el mejoramiento de los servicios básicos, como la salud y la prevención de enfermedades infantiles. (Figura 3)

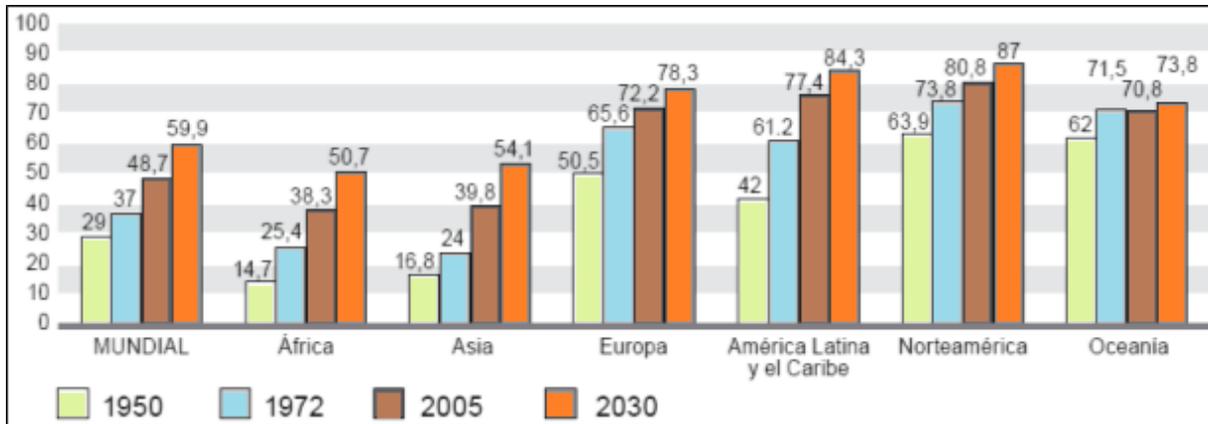


Figura 3. Porcentaje de la población que reside en áreas urbanas.

FUENTE: Naciones Unidas (2006), citado por Antequera (2007)

3.4.Clima Urbano

El clima es el resultado de complejas interacciones entre los elementos climáticos como: temperatura, humedad, precipitación etc. y los procesos físicos que se desarrollan en la atmósfera, océanos y superficies (Goldreich, 1995; citado por Pereira, 2006). La alteración de las propiedades físicas y químicas del aire existente en las ciudades ha modificado considerablemente elementos climáticos como: la visibilidad, la temperatura, el viento, entre otros, de forma microclimática, originando un clima muy especial: “el clima urbano” (Seoáñez, 2001).

La climatología urbana, ciencia que estudia el clima urbano, busca describir los cambios en el clima que ocurren en la atmósfera de la ciudad (Pagliarini, 2008). El desarrollo de esta ciencia ha crecido significativamente el siglo pasado debido al crecimiento urbano producido durante dicho siglo, despertando así un interés por el estudio del medio físico de las ciudades y por el clima urbano (Moreno, 1990).

El clima urbano depende de una diversidad de factores (Figura 4), tanto naturales (latitud, topografía, cubierta vegetal, entre otros) como artificiales (calor producido por el hombre, contaminación atmosférica, etc.)

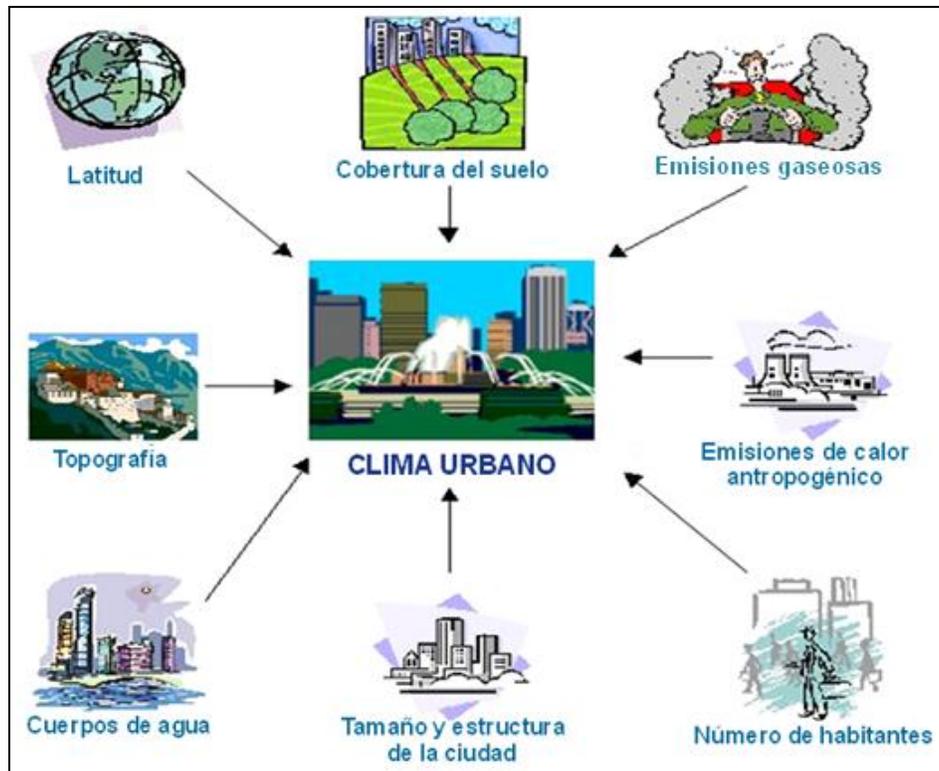


Figura 4: Factores que afectan al clima urbano.

3.4.1. Características urbanas que interfieren en el clima

La irregularidad de la superficie urbana, muy distinta a la natural, la contaminación atmosférica, el tamaño de la ciudad y las modificaciones de los componentes naturales del ecosistema para el asentamiento urbano son factores que modifican las condiciones climáticas que rodean al área urbana.

La topografía urbana de una ciudad modifica el flujo del viento, ocasionando que este flujo se haga más turbulento por la presencia de obstáculos, como edificaciones o cables de corriente (Henry y Heinke, 1999). El efecto más frecuente que produce la ciudad en el viento es la “brisa urbana”, donde el aire caliente se eleva dentro de la ciudad durante

el día hasta cierta altura y luego se dirige hacia la periferia, donde desciende casi hasta la superficie, para dirigirse finalmente hacia el centro de la ciudad (Seoánez, 2001).

Los materiales utilizados en la ciudad son muy distintos a los que existen en el suelo natural o vegetación natural, y al tener distintas propiedades en relación con el campo abierto influyen en el balance de agua y energía. Estos materiales usados en la ciudad se diferencian en: (a) almacenamiento de calor, (b) almacenamiento del agua, (c) absorción de la radiación solar y (d) todos los componentes del ciclo hidrológico (evaporación, filtración, escurrimiento y almacenamiento de agua). Además, en las ciudades, se liberan grandes cantidades de energía hacia la atmósfera proveniente de las actividades humanas que consumen combustibles, como lo son: la industria, transporte, etc. (Henry y Heinke, 1999),

La contaminación atmosférica urbana origina que los núcleos higroscópicos que posee el aire urbano se hagan más persistentes que en el campo facilitando, así, la presencia de nieblas en la ciudad. Además, la contaminación existente incrementa las partículas en suspensión, las cuales favorecen el incremento de la nubosidad en la ciudad, y según Seoánez (2002) el aumento significativo de niebla y nubosidad puede reducir el periodo de insolación a nivel urbano.

3.4.2. Atmósfera Urbana

Según Moreno (1999), la atmósfera urbana a comparación de la rural, se diferencia en que su composición natural ha sido modificada por: (a) la presencia de gases contaminantes como lo son: el dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, entre otros; (b) los compuestos orgánicos, (c) los productos fotoquímicos, como el ozono troposférico y (d) las partículas sólidas o aerosoles. (Figura 5).

COMPOSICIÓN DEL AIRE	
Atmósfera rural	Atmósfera urbana
Mezcla de gases { N ₂ O ₂ Ar CO ₂ y otros	Mezcla de gases { N ₂ O ₂ Ar CO ₂ y otros
Partículas sólidas y líquidas en suspensión (polvo, humos, cenizas, sales, etc.)	Partículas sólidas y líquidas en suspensión (polvo, humos, cenizas, sales, etc.)
	SO ₂ , NO, NO ₂ , CO, etc.
	Compuestos orgánicos
	Productos fotoquímicos (O ₃)
	Aerosoles (Al, As, C, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V, etc.)

Figura 5: Composición de la atmósfera rural y urbana.

FUENTE: Moreno, 1999

Gran parte de los productos, producidos por las actividades humanas, que componen la atmósfera urbana se constituyen en catalizadores, que benefician reacciones químicas y fotoquímicas, es decir con intervención de la radiación solar (Moreno, 1999). Entre las reacciones fotoquímicas más importantes que se produce en la atmósfera urbana, se tiene la formación del ozono troposférico (Figura 6):

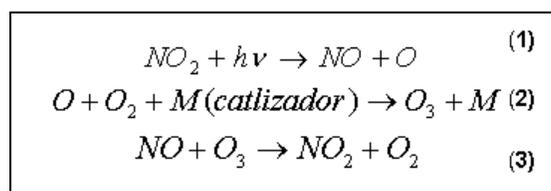


Figura 6: Formación del ozono troposférico.

El ozono troposférico es un poderoso oxidante, fuerte reactivo, es nocivo para la salud humana y animal, y además es componente básico para la formación del smog fotoquímico, por lo que es una de las principales causas de contaminación ambiental en las áreas urbanas (CCA, 2008).

De acuerdo a Moreno (1999), entre las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera urbana, la más destacable es la formación del ácido sulfúrico (Figura 7):

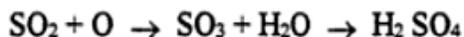


Figura 7: Formación del ácido sulfúrico.

El dióxido de azufre, presente en la atmósfera urbana por las emisiones generadas de las actividades que ocurren dentro de la ciudad, al reaccionar con un átomo de oxígeno forma el anhídrido sulfúrico (SO_3), que absorbe el vapor de agua presente en la atmósfera, dando lugar a la formación del ácido sulfúrico, compuesto que favorece la formación de nieblas. Seoáñez (2002) menciona que, además, este compuesto puede quedar suspendido en el aire en formas de pequeñas gotas durante un periodo de dos años o hasta más, y así cuando existen precipitaciones, el ácido sulfúrico es arrastrado hacia la superficie terrestre acidificando el agua de lluvia (lluvia ácida).

Si bien se ha observado que existen diferencias entre la composición de la atmósfera rural y urbana, Oke (1981), citado por Pagliarini (2008), distinguió que en la ciudad, el flujo del viento, proveniente de las áreas rurales, presenta una atmósfera estratificada y diferenciada (Figura 8), por lo que propuso la siguiente división:

- a. La capa límite del dosel urbano: es la capa atmosférica existente desde la superficie urbana hasta el nivel de los techos de la ciudad, producido por procesos de pequeña escala situados en la calle, entre edificios, etc. (Pagliarini, 2008).

- b. La capa límite urbana: es aquella porción de la atmósfera donde las características climáticas están influenciadas por la presencia de la superficie de la ciudad. Se extiende desde encima de los techos hasta un nivel por debajo del cual los fenómenos locales o mesoescálicos estén dominados por la naturaleza de la superficie urbana. Esta capa tiene una mayor extensión, durante las horas del día, debido a que la convección contribuye a elevarla, sin embargo, durante las noche, la capa límite urbana es más estable y disminuye

su extensión porque no hay procesos convectivos que originen la transferencia vertical (Moreno, 1999).

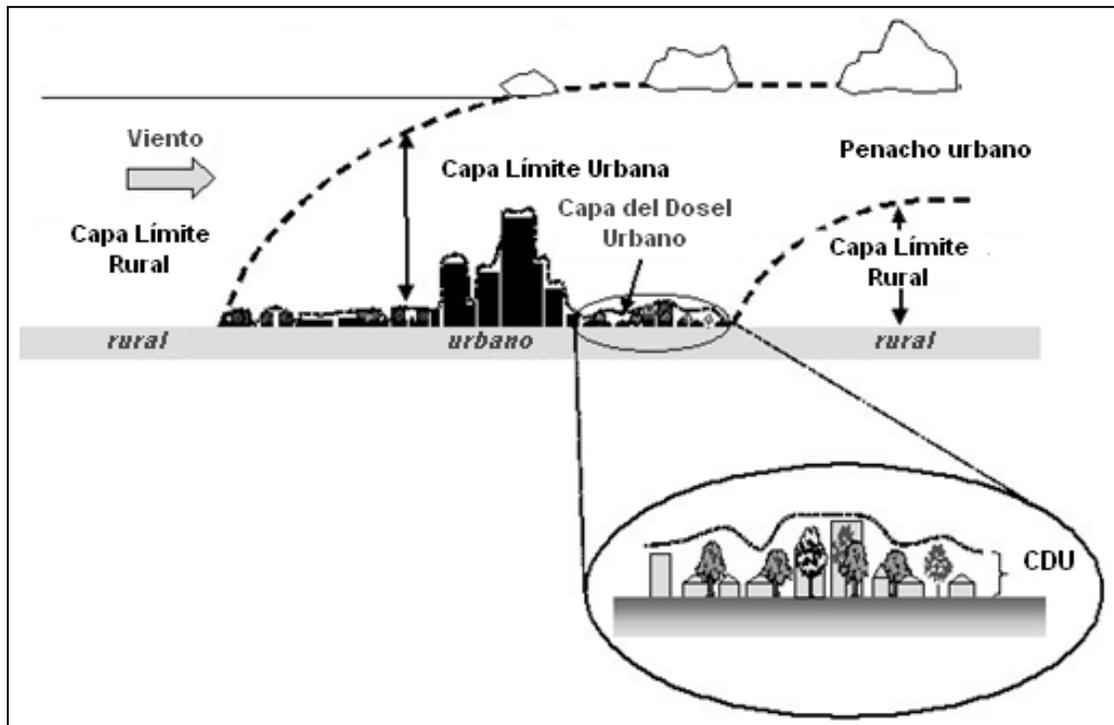


Figura 8: Componentes de la atmósfera urbana.

FUENTE: Voogt, 2008

El penacho urbano es la prolongación del sotavento de la ciudad de la capa límite urbana sobre el área rural y su capa límite. Según Moreno (1999), esta porción atmosférica solo puede observarse cuando existe un flujo de viento dominante sobre la ciudad que sea capaz de arrastrar la influencia de la capa límite urbana sobre el área rural.

3.5. Isla de calor

3.5.1. Formación de las islas de calor

La formación de la isla de calor urbana es complejo en su origen debido a que este fenómeno responde a causas urbanas que afectan a la atmósfera, como la elevación de las concentraciones de partículas en suspensión y gases contaminantes, menor intensidad del viento, radiación solar y entre otros, y también responde a causas originadas por la misma ciudad (uso del suelo, rugosidad de la superficie, mayor emisión de calor, etc.). (Figura 9).

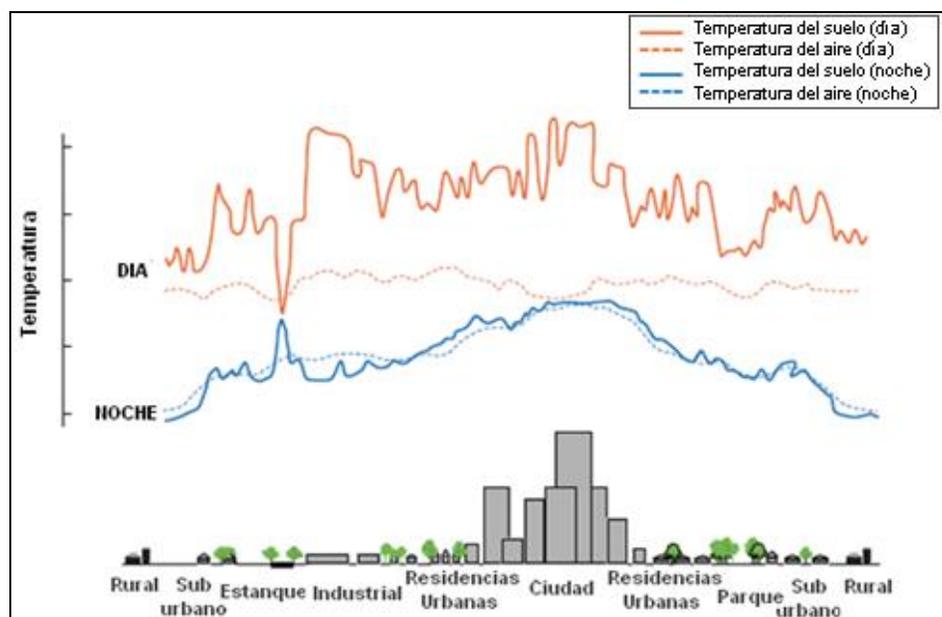


Figura 9. Variación de la temperatura superficial y atmosférica

FUENTE: EPA. Modificado de Voogt (2000)

La radiación solar que llega a la superficie, durante el día a la ciudad, es almacenada por los materiales de construcción urbanos (Figura 10), gracias a sus propiedades térmicas y caloríficas. El calor total almacenado durante el día, es liberado hacia la atmósfera durante las noches, calentándose más que el aire circundante que la rodea. Además, la producción de calor antropogénico liberado por las actividades humanas, prácticamente, es casi constante durante las 24 horas del día, contribuyendo a aumentar la temperatura del aire. Por otro lado, la disminución de la evaporación, por el cambio de la cobertura natural del suelo y por la eficacia de los sistemas de drenaje urbano, así como la pérdida de calor

sensible, por la disminución de la velocidad del viento originada por los edificios, y la captura de la radiación en onda larga por los materiales contaminantes presente en la atmósfera aumentan significativamente la presencia e intensidad de las islas de calor en áreas urbanas (Moreno, 1999).

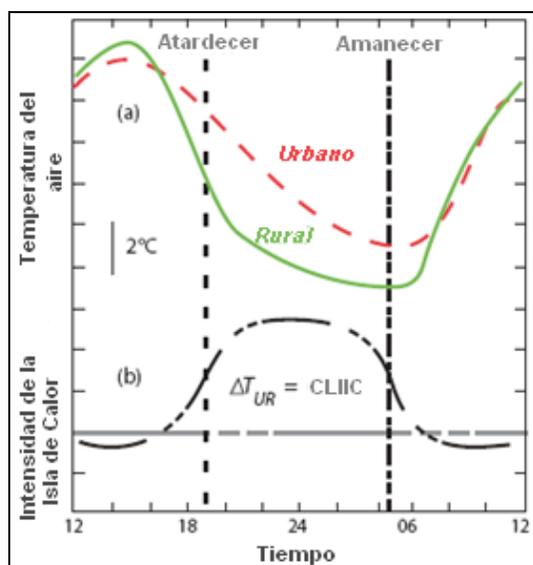


Figura 10. Evolución diurna de la isla de calor.

FUENTE: EPA. Modificado de Runnalls y Oke (2000)

Son muchos los factores que contribuyen a la formación de la isla de calor y condicionan la intensidad del fenómeno en una ciudad. Los factores que influyen en la aparición e intensificación de la isla se pueden clasificar según: la morfología urbana de la ciudad, los parámetros meteorológicos y la contaminación atmosférica.

a. Morfología urbana: Según Moreno (1999), la configuración espacial de la isla de calor depende de esta categoría, por lo que existen diversas formas de isla de calor tantas como ciudades morfológicamente diferentes existan.

- Propiedades de los materiales de la superficie

Las propiedades térmicas y radiactivas, como la reflectancia solar (albedo), emisividad y capacidad calorífica, de los materiales empleados en la construcción de la infraestructura urbana son muy distintas a los materiales de la superficie natural, por lo que influye en el desarrollo de la isla de calor y determina como la energía del sol será reflejada, emitida y absorbida (EPA, 2007).

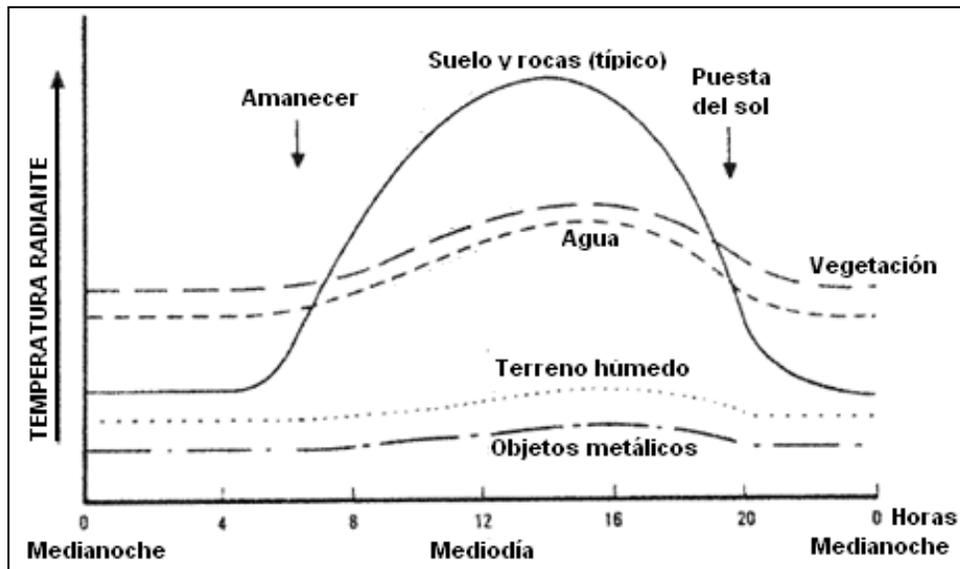


Figura 11. Fluctuación de la temperatura de diferentes materiales de superficie durante un día.

FUENTE: Sabins (1997), citado por Streutker (2003)

La infraestructura de las áreas urbanas está compuesta por materiales que poseen valores bajos de albedo, a comparación de las áreas rurales, por lo que estos materiales reflejan en menor cantidad la energía solar recibida y absorben más cantidad de la misma, originando que los materiales de superficie aumenten en su temperatura. Por ejemplo, en la Figura 11, se observa que las rocas y el suelo, que muestran carácter similar al de los materiales urbanos (Streutker, 2003), son los que presentan mayor valor de temperatura. Otra de las propiedades importantes a considerar es la emisividad de los materiales, definida por la EPA (2007) como “la capacidad de una superficie de

emitir calor de onda larga de radiación”, debido a que la gran mayoría de estos materiales, a excepción del metal, tienen altos valores de emisividad. Finalmente, la capacidad calorífica, capacidad de almacenar calor, influye en la formación de las islas de calor ya que la ciudad es más eficiente en el almacenamiento de la energía solar.

- Tamaño de la ciudad

El tamaño de la ciudad es un factor importante en la formación de la isla de calor. Oke (1973), citado por Moreno (1999), relacionó el tamaño de la ciudad con el efecto isla de calor, utilizando el número de habitantes como un valor representativo del tamaño de la ciudad, observando que la isla térmica se ve intensificada cuando existe mayor población urbana en la ciudad.

- Incremento de la superficie rugosa

El incremento de los materiales urbanos (superficie rugosa), utilizados en la construcción de las edificaciones, repercute en el flujo natural del viento, disminuyendo su velocidad, lo que ocasiona la inhibición de la pérdida de calor sensible a través de la convección atmosférica (Streutker, 2003) y por ende es uno de los factores condicionantes de la formación de la isla de calor. Además el incremento de superficie rugosa, muchas veces, significa la disminución de áreas verdes y/o superficies naturales.

- Radiación solar

La radiación solar es una de las principales causas meteorológicas de la presencia de la isla, debido a que este fenómeno es un alza en la temperatura. El aumento de la absorción de la radiación solar, la irradiación durante las noches y el aumento de la radiación en onda larga, la cual es absorbida y reemitida por los materiales urbanos y la contaminación atmosférica, contribuyen a generar este fenómeno (Moreno, 1999). Además, según Moreno (1999), el balance de energía también influye en la formación

de las islas de calor urbana, debido a que en la ciudad se genera calor antropogénico que modifica el balance energético y que constituye un sumando decisivo en el balance.

b. Parámetros meteorológicos: De esta categoría depende principalmente la intensidad de la isla de calor urbana. Los factores más importantes son:

- Evapotranspiración

Como el crecimiento de las áreas urbanas reemplaza el suelo natural por uno artificial, generalmente la presencia de áreas verdes se ven reducidas ocasionando una disminución en la evapotranspiración como una pérdida de fuente de calor latente con relaciones a las áreas rurales y por ende un aumento en la temperatura del aire (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Además, el uso de superficies impermeables y de sistemas de drenaje para el transporte de aguas superficiales, también afecta a la pérdida de calor latente a través de la evaporación (Streutker, 2003).

- Humedad atmosférica

Se define como humedad a las gotas higroscópicas de vapor de agua que se encuentren en la atmósfera (Martines, 2007). El agua tiene una gran propiedad termorreguladora, por lo que es capaz de reducir las variaciones térmicas que puedan ocurrir en el aire (Seoáñez, 2001). Por ende zonas que posean altos valores de humedad, serán menos propensos a sufrir grandes diferencias entre las temperaturas urbanas y rurales.

- Viento

El viento es el principal causante de la intensidad de la isla de calor, ya que ésta muestra una gran sensibilidad a su presencia. Cuando la velocidad del viento aumenta,

la diferencia de la temperatura entre la zona rural y urbana disminuye, existiendo límites umbrales, los cuales al ser sobrepasados impiden el desarrollo de las islas. Además, el viento modifica la configuración de las islas, es así que cuando exista un flujo moderado de viento que permite el desarrollo de la isla de calor, dará a lugar a variadas configuraciones. (Moreno, 1999)

c. Contaminación atmosférica: Las áreas urbanas, debido a la presencia de las actividades humanas, tienen un rol importante en la formación de las islas de calor. Los principales factores en esta categoría son:

- Polución

Las diversas actividades que se desarrollan en la ciudad, como por ejemplo el transporte, originan que la composición de la atmósfera urbana sea alterada a comparación de la atmósfera rural. Los contaminantes y emisiones de gases de efecto invernadero generados en las ciudades, principalmente partículas en forma de aerosoles, absorben y reirradian la radiación de onda larga hacia la superficie, evitando su pérdida hacia las capas más altas de la atmósfera, y contribuyendo a incrementar la temperatura del aire, lo cual significa que es una de las causas que originan la presencia de las isla de calor (Streutker, 2003).

- Calor antropogénico

El calor antropogénico es el calor producido por las actividades humanas y generalmente se encuentra en las ciudades, zonas donde se concentran la mayor parte de la población. Este calor no natural ocasiona que la temperatura del aire en las ciudades se vea incrementada a comparación de las áreas rurales. Según la EPA (2007), muchas de las fuentes son: sistemas de calefacción y refrigeración, funcionamiento de equipos, transporte y procesos industriales.

3.5.2. Impactos de la isla de calor urbana

De acuerdo a Meier (2006), la isla de calor urbana fue observada por primera vez hace más de un siglo en las ciudades ubicadas en latitudes norte y este fenómeno tenía un efecto positivo debido a que disminuyó el uso de calefacción durante los inviernos. Sin embargo, conforme pasaron los años, las ciudades aumentaron en tamaño y población, y no fue hasta la década del 1960, donde la población se hizo más dependiente del uso de los automóviles y de los sistemas de calefacción y refrigeración, que los impactos negativos de la isla de calor se hicieron evidentes. Desde ese entonces, este fenómeno se ha convertido en una de las principales preocupaciones ambientales dentro del área urbana.

Tabla 2. Impactos ambientales de la urbanización

COMPONENTE AMBIENTAL	COMPONENTE URBANO			
	Población	Uso del suelo	Transporte	Servicios
Impactos humanos	Impactos psicológicos de la vida en zonas de alta densidad	Impactos psicológicos	Niveles de ruido más altos. Efectos del ruido y la contaminación del aire en la salud
Litósfera	Incremento en la transformación de tierras agrícolas o no utilizadas y deshabitadas para usos urbanos.	Cambios completos debido a construcción, enjardinado, etc.	Destrucción o deformación del paisaje, etc.	El relleno sanitario para los desperdicios urbanos y la instalación y reparación de servicios alteran el paisaje
Atmósfera	Creciente liberación de CO ₂ , menor producción de O ₂ conforme las colonias vegetales son destruidas por la expansión de las áreas urbanas	Temperaturas medias más elevadas en la mayor parte de las áreas urbanizadas	Contaminación del aire por quema de combustible. Creación de smog fotoquímico. Emisión de plomo por ciertos motores.	Partículas, emanaciones nocivas de incineradores, rellenos sanitarios, obras de tratamiento de aguas negras, etc.
Hidrosfera	Mayor demanda de recursos acuíferos	Uso intensivo de recursos hidrológicos que causa una carga de contaminación mayor	Agua pluvial y superficial contaminada por Patrones de drenaje alterados por la infraestructura.	Lixiviados de contaminantes de los rellenos sanitarios. Contaminación proveniente de barcos. Descarga de las salidas del alcantarillado.

FUENTE: Henry y Heinke (1999)

Los impactos ambientales que origina la urbanización son muy diversos (Tabla 2). En el aire se tiene como principales fuentes contaminantes a: (a) la industria, (b) todas las formas de transporte, (c) los sistemas de aire acondicionado (d) los incineradores municipales, (e) las obras para tratamiento de aguas negras, (f) las quemas al aire libre y (g) los rellenos sanitarios. Estas fuentes de contaminación modifican la química de la atmósfera debido a la emisión de grandes cantidades de CO₂, óxidos de azufre, nitrógeno,

polvo, material particulado y sustancias químicas tóxicas. La combustión de hidrocarburos, principalmente provenientes del transporte, origina el smog fotoquímico, el cual es generado por la interacción de productos secundarios del proceso de combustión y la energía de la radiación solar. Sobre el centro urbano, como resultado del calor generado por los sistemas de combustión y las industrias y de la reirradiación de superficies que absorben calor, se produce un calentamiento del aire de importante magnitud a comparación de las áreas rurales o circundantes (Henry y Heinke, 1999).

3.5.3. Detección de la isla de calor

Las áreas urbanas y rurales tienden a experimentar variaciones microclimáticas por la diferencia en la topografía o por la influencia de la zona urbana sobre la zona rural, por lo que la diferencia entre las temperaturas urbanas-rurales no son necesariamente una buena medida para medir los efectos de las ciudades en la temperatura. La única manera de conocer a ciencia cierta el efecto producido por las áreas urbanas es realizando medidas de temperatura antes y después del desarrollo de la urbanización, sin embargo los datos antes del proceso de urbanización, generalmente, no se encuentran disponibles. Por ello, la diferencia de temperatura urbano-rural no se debe considerar, necesariamente, como una medida de cómo la urbanización ha cambiado al clima local (Runnalls, 1995).

Para detectar y caracterizar el fenómeno de la isla de calor en una ciudad, se pueden utilizar distintos métodos, entre los cuales destacan: (a) la comparación de registros de temperatura en estaciones urbanas y rurales, (b) el análisis de series históricas de temperatura, (c) el método de los transectos, (d) las observaciones aéreas con imágenes térmicas y (e) modelos climáticos meteorológicos.

Con el advenimiento de la alta resolución de vigilancia de los satélites que observan la tierra, la tecnología de la teledetección ha sido ampliamente utilizada para medir la temperatura de superficie del suelo y proporcionar datos básicos y fundamentales para el análisis de isla de calor urbano. En comparación con la meteorología tradicional este método de observación, tiene ventajas de alta resolución, amplia cobertura e intensivos

puntos, etc., lo que hace posible a gran escala la investigación de isla de calor urbano. Diferentes métodos para la obtención de la temperatura superficial del suelo (TSS) se han desarrollado de acuerdo al manejo de una o más bandas térmicas, tales como el método Split-window (Sobrino et al. 1996), método de separación de temperatura / emisividad (Gillespie et al. 1998), el método de un solo canal (Jimenez-Munoz et al. 2003) y Mono-window (Quin, 2001; Sobrino, 2004; Li, 2006)

IV. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

Aspecto geográfico

El estudio está enfocado en el ámbito geográfico de la ciudad de Arequipa, este está conformado políticamente por 14 distritos (Tabla 3), cubre una superficie de 721.32 km², sus puntos más extremos están aproximadamente entre las coordenadas geográficas: 16° 18' 30" y 16° 30' 0" latitud Sur, y 71° 24' 0" y 71° 39' 0" latitud Oeste (Figura 12). Es atravesado por tres ríos que pertenecen a la vertiente del Pacífico: río Chili, Vitor y Sogay. Desde la ciudad se observan una serie de conos volcánicos que forman nevados como el Misti, Chachani y Pichu Pichu.

De acuerdo a la clasificación de ciudades del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento la ciudad de Arequipa es considerada como la metrópoli de la macro región sur.

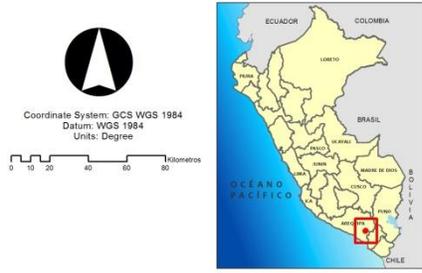
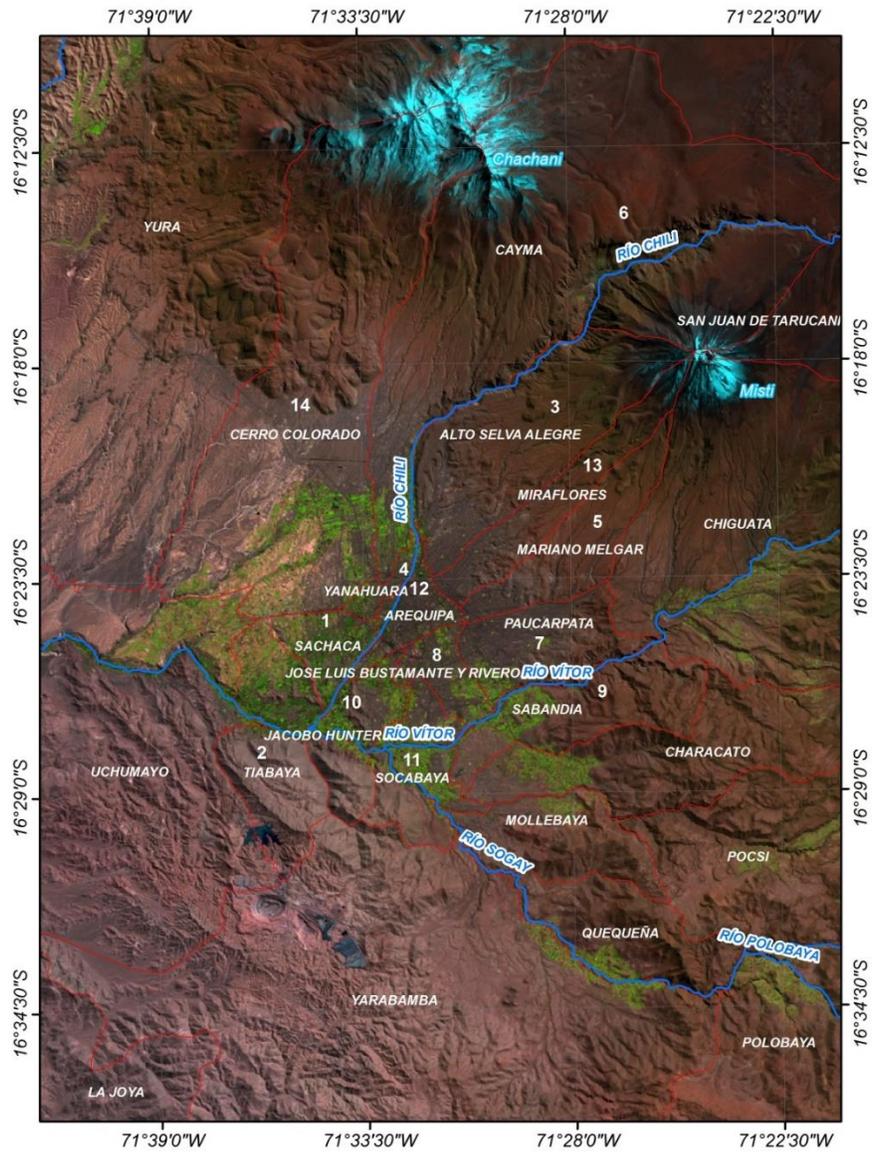


Figura 12. Ubicación geográfica de la ciudad de Arequipa.

Tabla 3. Distritos que conforman la ciudad de Arequipa.

N°	Distritos - Ciudad de Arequipa	ALTITUD	AREA (km2)
1	SACHACA	2240	13
2	TIABAYA	2178	39
3	ALTO SELVA ALEGRE	2500	67
4	YANAHUARA	2390	5
5	MARIANO MELGAR	2385	29
6	CAYMA	2403	237
7	PAUCARPATA	2405	28
8	JOSE LUIS BUSTAMANTE Y RIVERO	2310	11
9	SABANDIA	2390	36
10	JACOBO HUNTER	2250	20
11	SOCABAYA	2300	25
12	AREQUIPA	2335	11
13	MIRAFLORES	2430	27
14	CERRO COLORADO	2406	173

FUENTE: INEI

Aspecto demográfico

Arequipa es la segunda ciudad más poblada del Perú después de Lima. Según proyecciones del INEI en el año 2015 alcanzó los 869351 habitantes (Tabla 4), manteniendo una relación aproximada de 1 a 10 respecto de Lima.

Tabla 4. Cantidad de habitantes en los distritos de la ciudad de Arequipa.

N°	Distritos - Ciudad de Arequipa	POBLACIÓN (ha)
1	SACHACA	19,581
2	TIABAYA	14,768
3	ALTO SELVA ALEGRE	82,412
4	YANAHUARA	25,483
5	MARIANO MELGAR	52,667
6	CAYMA	91,802
7	PAUCARPATA	124,755
8	JOSE LUIS BUSTAMANTE Y RIVERO	76,711
9	SABANDIA	4,136
10	JACOBO HUNTER	48,326
11	SOCABAYA	78,135
12	AREQUIPA	54,095
13	MIRAFLORES	48,677
14	CERRO COLORADO	148,164

FUENTE: INEI

Aspecto económico y social

Arequipa es la segunda ciudad más industrializada en el Perú, después de Lima, lidera la economía en la macro región del sur. Dentro de su actividad industrial destacan los productos manufacturados y la producción textil de lana de camélidos con calidad de exportación.

En el 2012, fue considerada dentro de las 50 mejores ciudades para hacer negocios en América Latina según el reporte de la revista América Economía, posicionándose en el puesto 29 de dicho ranking. (Tabla 5)

Tabla 5. Indicadores económicos de la ciudad de Arequipa.

Indicadores económicos - Ciudad de Arequipa				
Población (MM)	PIB 2012 (MM US\$)	PIB per capita 2012 (US\$)	% desempleo 2012	Nº bancos de inversión
0,9	6.495	7.311	5,9	1

FUENTE: Revista América Economía - Especial Ciudades

Tabla 6. PBI y PEA por sectores económicos.

Sectores	PBI 2005 (%)	PEA 1993 (%)
Primario	16.5	20.4
Agropecuario	9.7	17.3
Pesca	0.3	0.7
Minería	6.5	2.4
Secundario	22.5	15.9
Manufactura	19.2	11.3
Construcción	3.3	4.7
Terciario	61	63.7
Servicios	61	63.6
TOTAL	100	100

FUENTE: INEI, elaborado por Estudios Económicos Suc. Arequipa

4.2. Materiales y software

4.2.1. Materiales

- *Imágenes de satélite*

Para el presente estudio se utilizó imágenes landsat 5 y landsat 8, las cuales tienen una resolución de 60 a 120 metros por pixel (dependiendo del sensor). La hora solar local de pasaje del satélite por el ecuador es 10 am -15/+15 min. La descarga se realizó del servidor USGS Global Visualization Viewer (GloVis), disponibles de forma gratuita mediante la página web: <http://glovis.usgs.gov>.

Tabla 7. Imágenes Landsat utilizadas en el estudio

Tipo de sensor	Fecha	Hora (UTC)	Path	Row
Landsat 5 TM	6 de noviembre de 2016	14:57	003	071
Landsat 8 TIRS/OLI	27 de noviembre de 2013	14:57	003	071
Landsat 8 TIRS/OLI	3 de noviembre de 2016	14:57	003	071

- *Información en superficie*

En superficie se provechó tres estaciones de la red de monitoreo del SENAMHI, estas son las estaciones convencionales de Huasacache (2242 msnm), La Pampilla (2400 msnm) y Chiguata (2943 msnm), información que ayuda para el cálculo de la transmitancia de la atmósfera.

Tabla 8. Estaciones meteorológicas de la red de monitoreo del SENAMHI empleadas en el estudio.

Estación	Categoría	Distrito	Altitud	Longitud	Latitud
La Pampilla	Meteorológica agrícola principal	Arequipa	2365	-71°31'24,02"	-16°24'18,22"
Huasacache	Climatológica ordinaria	Jacobo Hunter	2207	-71°33'58,96"	-16°27'27,95"
Chiguata	Climatológica ordinaria	Chiguata	2902	-71°24'33,8"	-16°24'23,21"

4.2.2. Software

- ✓ ENVI 5.1
- ✓ ArcGIS 10.2

4.3. Metodología

4.3.1. Recolección y selección de imágenes LandSat

Se recolectó y seleccionó imágenes LandSat del banco de imágenes satelitales del servidor USGS Global Visualization Viewer (GloVis), las cuales tienen un nulo porcentaje de nubosidad, con fechas de 06-11-2011 (L5), 27-11-2013 (L8) y 03-11-2016 (L8) de tal forma que permita exhibir los cambios de manera secuencial que ha venido sosteniendo el área estudio debido a los efectos de la urbanización.

4.3.2. Pre procesamiento de imágenes LandSat

En el estudio se empleará la técnica de Mono-window que fue desarrollada por Quin et al. (2001), basado en la ecuación de transferencia de radiación térmica, requiere de tres parámetros principales la emisividad, transmitancia y temperatura atmosférica efectiva promedio para finalmente obtener la TSS de Landsat. La banda térmica registra la radiación con un rango espectral en 10.4 a 12.5 micras. A partir del LandSat 8, se cuenta con dos bandas termales, en el presente trabajo se va utilizar imágenes desde LandSat 5 TM, por ello se está limitado a trabajar solo con técnicas monoespectrales.

En la figura 13, se presenta el esquema de la metodología que se va a desarrollar y más adelante se explica los pasos a seguir para obtener la TSS y con este resultado finalmente detectar la islas de calor urbano.

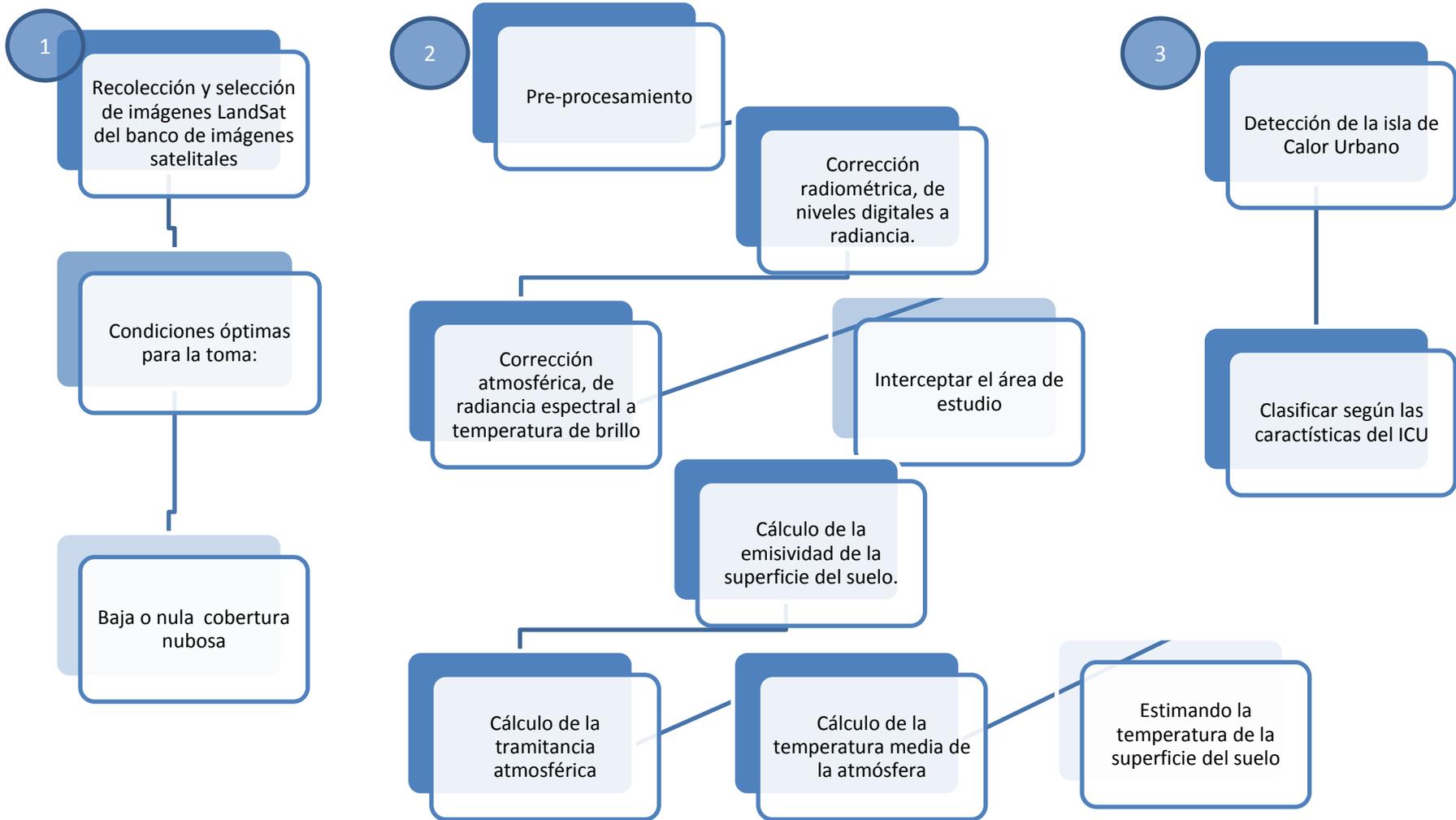


Figura 13. Esquema de metodología del estudio.

Conversión radiométrica:

Se calcula la radiancia de cada banda espectral, es decir, la efectiva conversión radiométrica en el que el número digital (ND) de cada píxel de la imagen se convierte en radiancia espectral monocromática.

$$L_i = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \frac{Q_{dn}}{Q_{\max}}$$

Donde:

L_i : es la radiancia espectral del sensor ($MW.cm^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

L_{\min} : Mínima radiancia espectral del sensor.

L_{\max} : Máxima radiancia espectral del sensor.

Q_{dn} : representa el valor de nivel digital del píxel

Q_{\max} : representa el máximo valor de nivel digital del píxel

Convertir la radiancia espectral a temperatura de brillo:

Se convierte la radiancia espectral en temperatura de brillo, el cual se basa en la función de Planck, expresado en la siguiente ecuación:

$$T_6 = K_2 / \ln\left(1 + \frac{K_1}{L_6}\right)$$

$$K_1 = 60.776 MW.cm^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$$

$$K_2 = 1260.56 K$$

Donde:

T_6 es la temperatura de brillo del Landsat TM

K_1 y K_2 son constantes de calibración del Landsat TM

L_6 representa la radiancia espectral del Landsat TM

Calcular la emisividad de la superficie del suelo:

Realizadas la corrección radiométrica y atmosférica, se calculará la emisividad usando NDVI, es uno de los índices de vegetación más ampliamente usados.

Calculando el NDVI:

Haciendo la relación entre la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda visible de color rojo (R), expresada en la ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Estimando la emisividad

Según Zhang, Wang et al., la emisividad del suelo puede ser calcula en función del NDVI. Por ejemplo, cuando un píxel tiene un valor NDVI que está por debajo de -0.185, entonces el valor de emisividad de 0.995 se le asigna al píxel, y así sucesivamente como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Estimación de la emisividad del suelo en función del NDVI.

NDVI	Land surface emissivity (ϵ)
$NDVI < -0.185$	0.995
$-0.185 \leq NDVI < 0.157$	0.970
$0.157 \leq NDVI \leq 0.727$	$1.0094 + 0.047 \ln(NDVI)$
$NDVI > 0.727$	0.990

Cálculo de la transmitancia atmosférica

La estimación de los parámetros atmosféricos como la transmitancia para el Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM + y Landsat 8 TIRS se ha usado de la calculadora de parámetros atmosféricos de la nasa (). La herramienta utiliza los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), modelos de los perfiles atmosféricos globales interpolados en una particular fecha, hora y ubicación como entradas. A

través de esta herramienta, el perfil atmosférico del área de estudio ha sido simulado a las condiciones durante el tiempo del paso del satélite. La herramienta soporta la simulación de los parámetros atmosféricos a partir de enero de 2000. Se encuentra en la siguiente dirección: <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>

Cálculo la temperatura media efectiva de la atmósfera

Con el fin de adquirir la temperatura atmosférica media efectiva de una zona, Qin et al. introdujo relaciones lineales para la aproximación de la temperatura media efectiva dependiendo de la ubicación de la atmósfera del área de estudio, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Estimación de la temperatura media de la atmósfera.

Area	Atmospheric temperature equation (T_a) (K)
For USA 1976	$25.9396 + 0.88045 \times T_o$
For tropical	$17.9769 + 0.91715 \times T_o$
For mid-latitude summer	$16.0110 + 0.92621 \times T_o$
For mid-latitude winter	$19.2704 + 0.91118 \times T_o$

De acuerdo a la ubicación, se podría estimar la temperatura media de la atmósfera, bajo la siguiente ecuación:

$$T_a = 17.9769 + 0.91715 * T_o$$

Donde

T_o es la temperatura del aire en superficie.

Estimando la temperatura de superficie del suelo

El algoritmo de mono-window se expresa con la siguiente ecuación:

$$T_s = \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_l - DT_a\}/C$$

$$a = -67.355351$$

$$b = 0.458606$$

$$C = \varepsilon_l x \tau_l$$

$$D = (1 - \tau_l)[1 + (1 - \varepsilon_l)x\tau_l]$$

Dónde:

T_s : es la temperatura de superficie del suelo (k).

τ_l : es la temperatura de brillo (k).

4.3.3. Identificación de Islas de Calor Urbano

Para analizar las islas, en forma conjunta, se elaboró un mapa representativo basado en seis eventos (Área urbanizada, área no urbanizada, menor al promedio, mayor al promedio, promedio $+T_1^\circ\text{C}$, mayor al promedio $T_2^\circ\text{C}$, siendo $T_1 < T_2$), este mapa nos permite ubicar con mayor precisión las islas de calor. Se considera como islas de calor urbanas a aquellas superficies que tienen una temperatura mayor al promedio de la temperatura encontrada en el área urbanizada. (Tabla 11)

Tabla 11. Categorización de la Intensidad de ICU

Intensidad de ICU	Rango
Intensidad Débil	Hasta 2°C
Intensidad Moderada	2 a 4°C
Intensidad Fuerte	4 a 6°C
Intensidad muy fuerte	Mayor a 6°C

FUENTE: Fernandez (1996), mencionado por Barros (2010).

V. RESULTADOS

La delimitación geográfica de lo que se está considerando como la ciudad de Arequipa se ha creado a partir del “Google Street View” y del “Open Streep Map” (ESRI).

Cabe mencionar algunas consideraciones con respecto al cálculo de la TSS, la banda infrarroja termal (10.40 – 12.50 μm), en las imágenes L5 y L7 es la banda 6, mientras en el L8 es la banda 10. Asimismo, para el cálculo del NDVI, el rojo visible y el infrarrojo cercano (NIR), en el L5 y L7 es la banda 3 y 4, respectivamente, en cambio en el L8, es la banda 4 y 5.

La temperatura promedio de la TSS en las zonas urbanas es de 45°C, esto se ha calculado de la extracción de los pixeles propiamente dicho del área urbana, mediante una combinación RGB llamada color verdadero y con ayuda del mapa topográfico mundial (ESRI) el cual diferencia áreas verdes y espacio urbano. Posteriormente, se ha realizado la sustracción de este valor promedio con los valores de temperatura de superficie de suelo de cada imagen satelital, obteniendo los valores de intensidad de las ICU.

La figura 14, exhibe la intensidad de las Islas de Calor Urbano (ICU) presentes en la ciudad de Arequipa, proveniente de la imagen satelital Landsat con fecha del 06-11-2011 tomada aproximadamente a las 10 am hora local. En esta imagen se detecta tres grandes núcleos de calor: al noroeste del distrito de Cerro Colorado, en el aeropuerto Alfredo Rodríguez Balión y al sureste del distrito de Socabaya, alcanzando valores de 6°C a 12°C de intensidad de ICU. En el resto de la ciudad se observa pequeños núcleos de calor, con mayor expansión en los distritos ubicados al norte y oriente de la ciudad entre ellos Cerro Colorado, Camay, Miraflores, Paurcarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Socabaya con valores entre 2°C a 8°C.

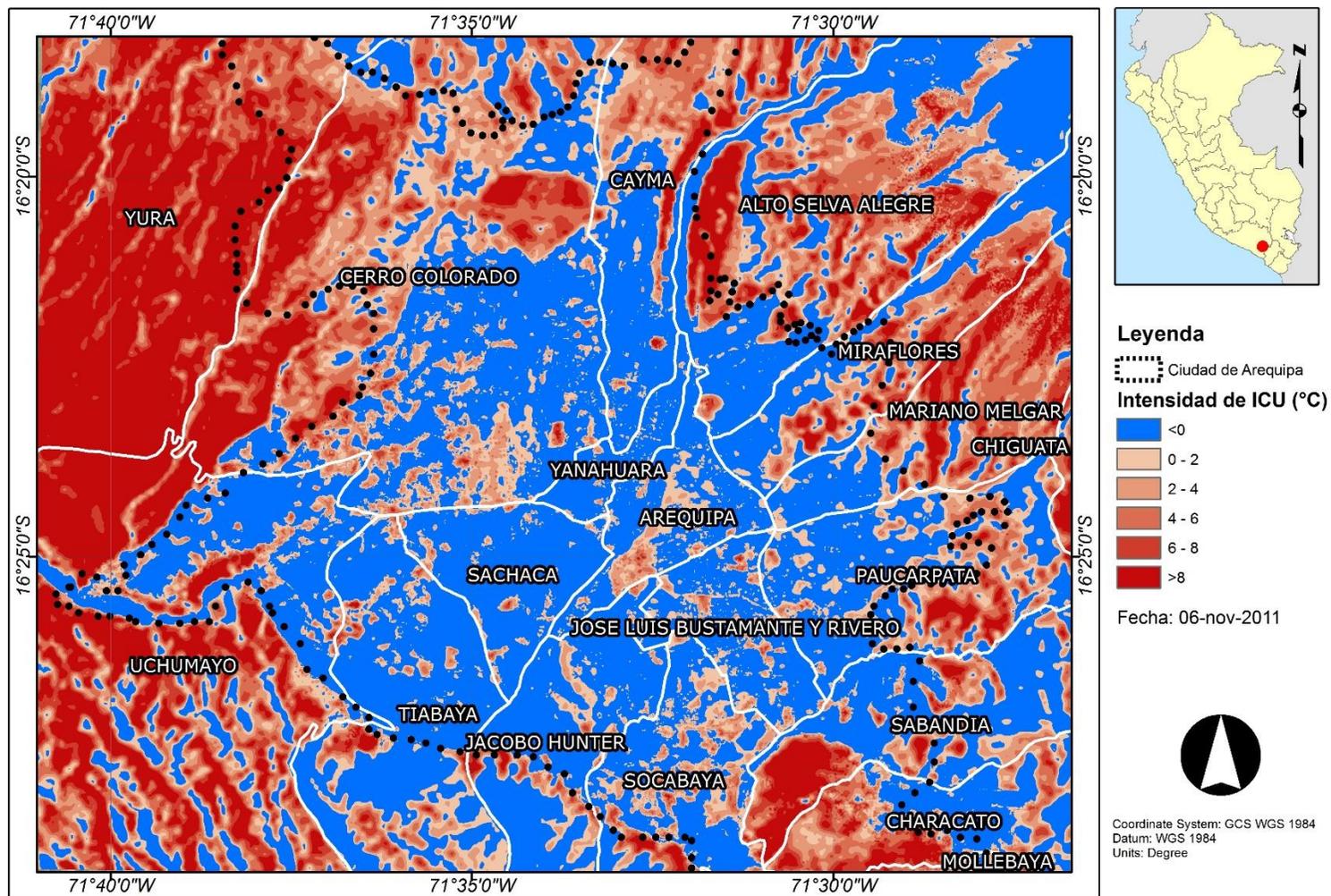


Figura 14. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 06-11-2011 a las 10:00 am hora local.

En la figura 15, con fecha del día 27 de octubre de 2011, se aprecia una expansión de las ICU dentro de sus periferias en los distritos de Cerro Colorado, Arequipa, Socabaya, José Luis Bustamante y Rivero, oscilando entre 2°C a 9°C. Se mantienen los ICU detectados en la primera imagen (Figura 15) además de la intensificación de sus valores alcanzando los 8°C a 12°C y un aumento en su circunscripción.

En la figura 16, con fecha del día 03 de noviembre de 2013, se mantienen los tres focos de calor identificados y una tendencia de aumento de los ICU al norte y este de la ciudad Arequipeña.

Notar que el centro de los movimientos e intercambios de actividades de la ciudad específicamente el distrito de Arequipa sufre un aumento de ICU a través del tiempo así como los distritos aledaños de Cerro Colorado, Arequipa, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar, José Bustamante y Rivero, Cayma y Socabaya.

Los valores más altos de ICU se encontraron en los tres focos de calor detectados, en el aeropuerto Alfredo Rodríguez Baldión con una intensidad entre los 10° a 12°C, al sureste del Distrito de Socabaya con valores entre 9°C a 11°C y al noroeste del distrito de Cerro Colorado con 8°C a 11°C. Los valores de ICU encontrados son considerados de intensidad muy fuerte, según la categorización de Fernández (1996), mencionado por Barros (2010).

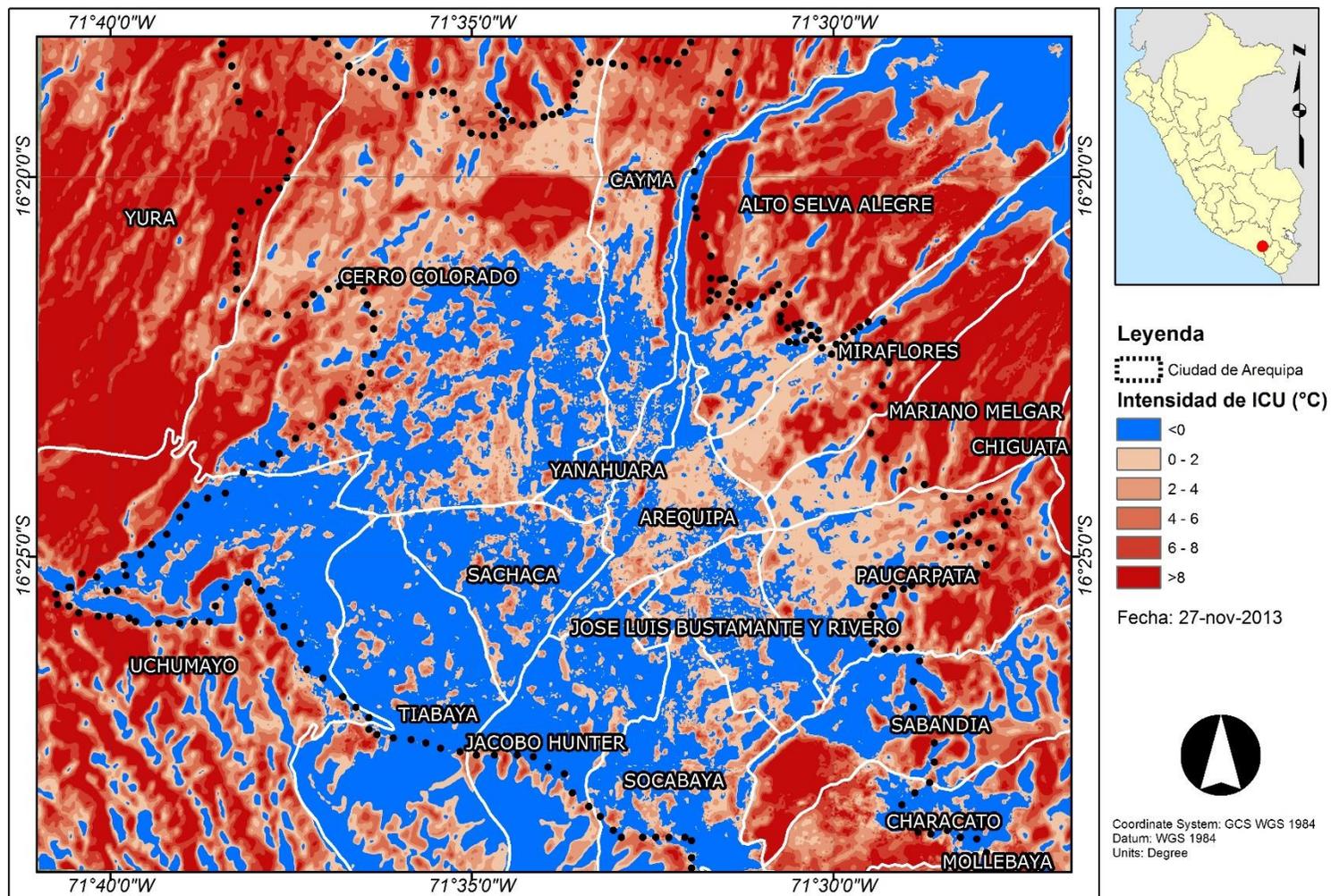


Figura 15. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 27-11-2013 a las 10:00 am hora local

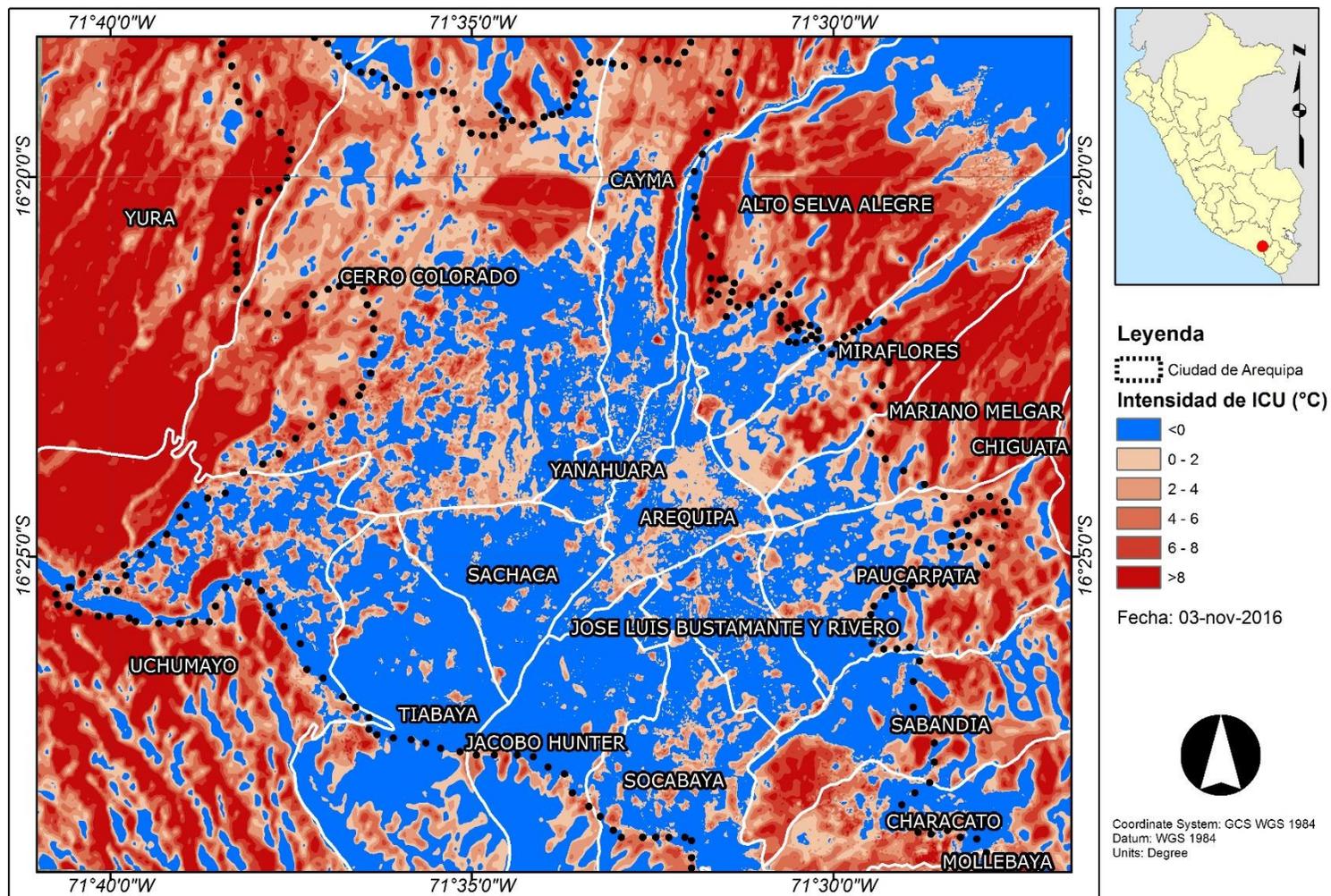


Figura 16. ICU en la Ciudad de Arequipa, con fecha de 03-11-2016 a las 10:00 am hora local.

VI. CONCLUSIONES

- Se detecta un incremento de ICU al extremo norte y oriente de la ciudad de Arequipa específicamente en los distritos de Cerro Colorado, Arequipa, Miraflores, Paucarpata, Mariano Melgar, José Bustamante y Rivero, Cayma y Socabaya.
- La mayor intensidad de ICU se encontró en la circunscripción del Aeropuerto Alfredo Rodríguez Balión presentando valores de 10°C a 12°C sobre el promedio (55°C a 57° C de TSS). Asimismo, también se observa una tendencia de aumento de la intensidad de las ICU al extremo norte y oriente de dicha ciudad.
- El análisis de las ICU nos ha permitido observar cómo va evolucionando la ciudad de Arequipa, es una gran herramienta para que tomadores de decisiones tomen cartas en el asunto y de tal modo mejoren el estado de su ciudad.

VII. SUGERENCIAS

- ✓ Se recomienda un análisis continuo de detección de ICU.
- ✓ Uso de imágenes con mayor resolución espacial como el Rapid Eye o el ASTER.
- ✓ Realizar el cálculo del ICU con otras metodologías y validarlos con datos en superficie.

VIII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. Capel, H. 1975. La definición de lo urbano. Scripta Vetera: Edición electrónica de trabajos publicados sobre geografía y ciencias sociales (en línea). Reproducido de la Revista Estudios Geográficos, No. 138-139: 265-301. Barcelona. Consultado 18 de ene. 2016. Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/sv-33.htm>
2. Qin, Z.; Zhang, M.; Amon, K; Pedro, B. Mono-window Algorithm for retrieving land Surface temperature from Landsat TM 6 data. *Acta Geogr. Sinica* 2001, 56, 456-466.
3. Liu, L. and Zhang, Z. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Int. J. Remote Sens.* 2011, 3, 1535-1552.
4. Landsberg, H.E. *The Urban Climate*; Academic Press: New York, NY, USA, 1981; pp. 84-89.
5. Streutker, D.R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *Int. J. Remote Sens.* 2002, 23, 2595-2608.
6. Lu, Y.; Feng, P.; Shen, C.; Sun, J. Urban Heat Island in Summer of Nanjing Based on TM Data. In *Proceedings of 2009 Joint Urban Remote Sensing Event*, Shanghai, China, 20–22 May 2009; pp. 1-5.

7. Sobrino, J.A.; Jimenez-Munoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.* 2004, 90, 434-440.
8. COELHO, André L. N. O Histórico da Ocupação e Impactos Socioambientais no Eixo Norte da RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte) em Áreas do Município de Ribeirão das Neves - MG (dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2003.
9. MENDONÇA, F. de A. Clima e Planejamento Urbano em Londrina. Proposição metodológica e de intervenção urbana a partir do estudo do campo termohigrométrico. In: Monteiro, C. A. de F; Mendonça, F. (Org.). Clima urbano. São Paulo: Contexto, 2003. p. 9-67.
10. MENDONÇA, F., DANNI-OLIVERIA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. Editora Oficina de texto. São Paulo. 2007. 206p. MONTEIRO, C. A. de F. Por um suporte teórico e prático para estimular estudos geográficos do clima urbano do Brasil. *GeoSul*. Nº 9, 1991. p.7-140.
11. MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. Clima Urbano. 2ª Edição. São Paulo: Contexto, 2011, 192 p. MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo Teoria e clima urbano. São Paulo: USP/IG, 1976.
12. NASCIMENTO, D. T. F. Emprego de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento na análise multitemporal do fenômeno de ilhas de calor no município de Goiânia-GO (1986/2010). Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Sociais - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011. 96f. OKE, T. R. *Boundary Layer Climate*, London, Methuen e Ltd. A. Halsted Press Book, Jhon Wiley e Sons, 372 pp., New York, 1978.
13. OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, New York. 86, n. 3, 2003. p. 371–384.

14. PEREIRA, L. C.; MARIANO, Z. de F.; WACHHOLZ, F.; Cabral, J. B. P. Análise da temperatura de superfície e do uso da terra e cobertura vegetal na bacia barra dos Coqueiros (Goiás). *Revista Geonorte*, edição especial 2, V.2, N.5, 2012. p.1243 – 1255.
15. RAO, P. K. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.53, 1972. p.647-648.
16. Li, J. Estimating land surface temperature from Landsat-5 TM. *Remote Sens. Technol. Appl.* 2006, 21, 322-326.

IX. ANEXOS

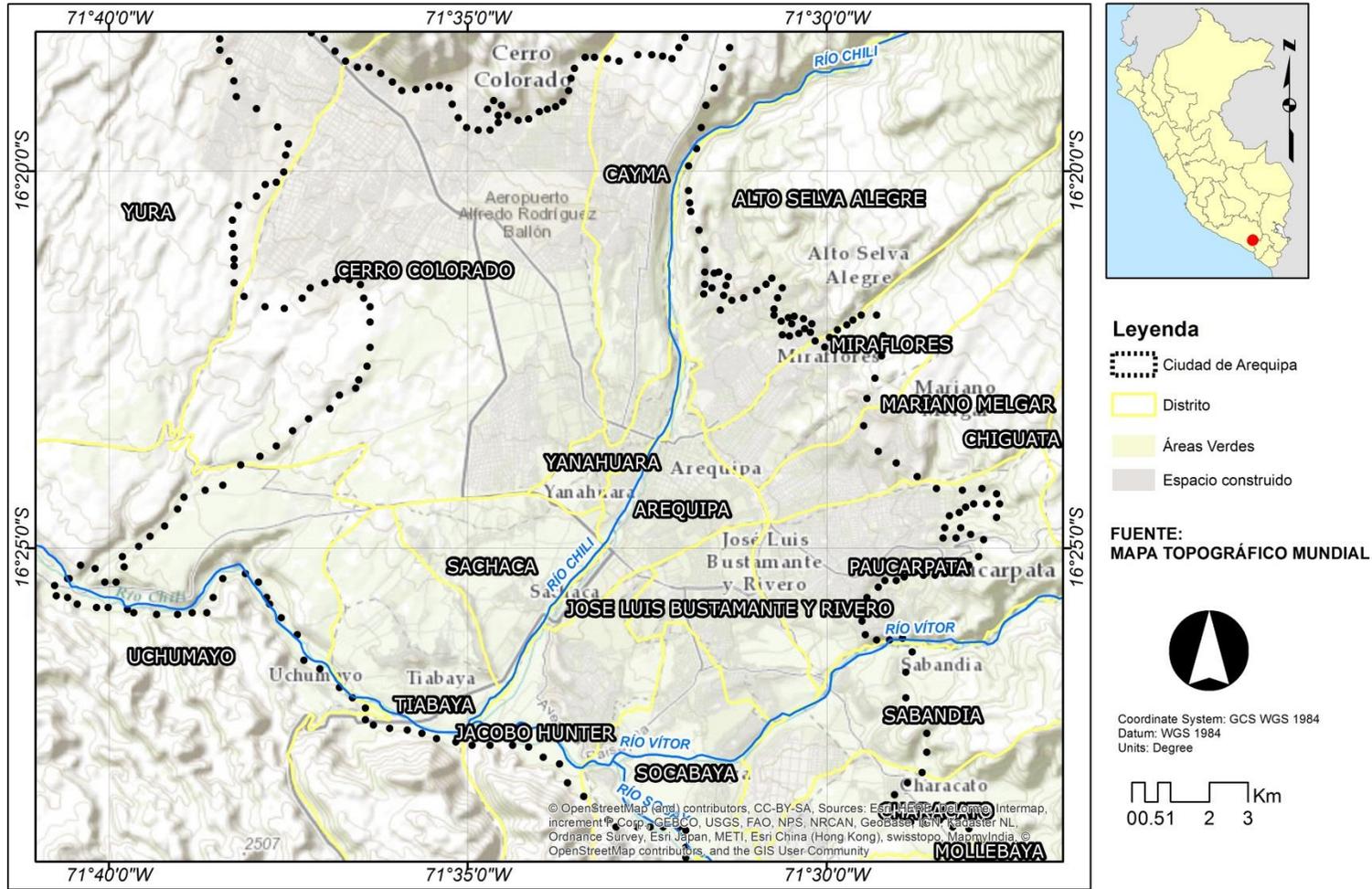
Anexo 1. Datos de temperatura en superficie y transmitancia atmosférica.

Tipo de sensor	Fecha	Hora (UTC)	LA PAMPILLA		CHIGUATA		HUASACACHE		Transmitancia
			TMAX (°C)	TMIN (°C)	TMAX (°C)	TMIN (°C)	TMAX (°C)	TMIN (°C)	
Landsat 5 TM	6 de noviembre de 2011	0.622916667	24.6	7.9	21.8	5.4	24.1	8	0.79
Landsat 8 TIRS	27 de noviembre de 2013	0.622916667	22.2	7.8	19.4	6.6	21.8	8.4	0.7
Landsat 8 TIRS	3 de noviembre de 2016	0.622916667	25.2	8.6			23.6	8.2	0.75

Anexo 2. Valores de TSS del área urbanizada específicamente de concreto y asfalto.

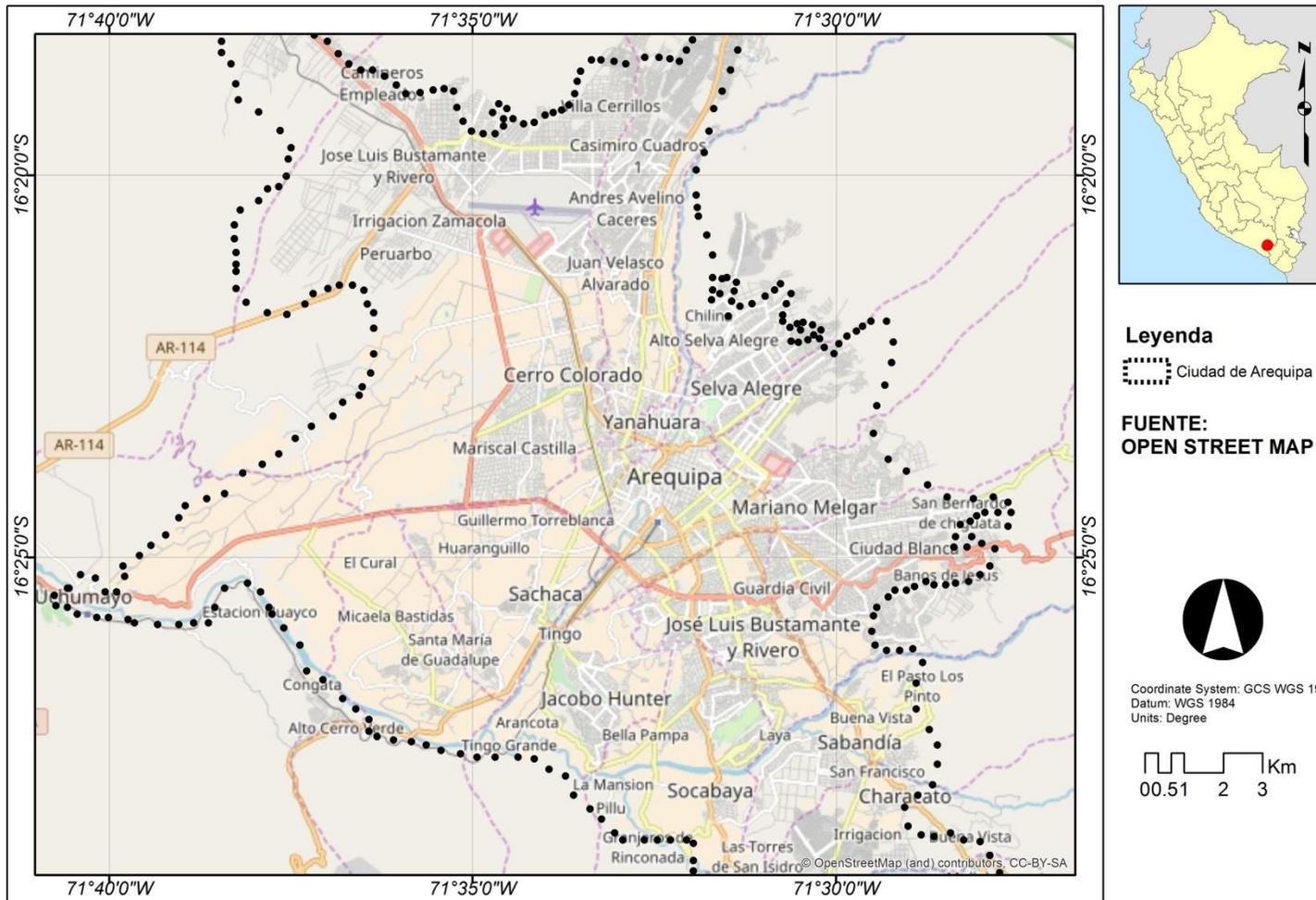
Tipo de sensor	Fecha	Hora (UTC)	TSS promedio (°C)	TSS máximo (°C)	TSS mínimo (°C)
Landsat 5 TM	6 de noviembre de 2011	14:57	44	52	40
Landsat 8 TIRS	27 de noviembre de 2013	14:57	45	55	42
Landsat 8 TIRS	3 de noviembre de 2016	14:57	44	52	39

Anexo 3. Mapa topográfico de la ciudad de Arequipa.



FUENTE: Mapa topográfico mundial (ESRI)

Anexo 4. Mapa de calles de la ciudad de Arequipa.



FUENTE: Open street map (ESRI).