

Análisis de la variación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el área metropolitana de Asunción

Analysis of the variation of the Terrestrial Surface Temperature (TST) and the Normalized Differential Vegetation Index (IVN) in the metropolitan area of Asunción

Claudia Patricia Caballero Chávez¹, Víctor Duarte López¹

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Autor correspondiente: claucaballeropy@gmail.com

RESUMEN: La temperatura de la superficie terrestre ha variado considerablemente en las últimas décadas, de acuerdo a varias investigaciones las regiones con los cambios más notables constituyen las zonas urbanas con mayor concentración poblacional. Por ello, el uso de datos espectrales provistos por sensores remotos permite disponer de una cobertura completa del territorio a distintas escalas espacio-temporales. Considerando que la ciudad de Asunción y sus alrededores, han tenido un alto crecimiento urbanístico, el objetivo de la presente investigación fue analizar la variación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y de la cobertura vegetal empleando el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en términos de área a través de un análisis multitemporal entre los años 1986 y 2011. La metodología utilizada se basó en la obtención y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5TM y el cálculo del IVN y de la TST. Por lo cual se logró determinar que en términos de área se presentó una variación en cada una de las categorías de IVN y TST.

Palabras clave: imágenes satelitales, Landsat 5TM, cobertura vegetal, crecimiento urbano.

ABSTRACT: The temperature of the earth's surface has varied considerably in recent decades, according to several investigations, the regions with the most notable changes are the urban areas with the highest population concentration. For this reason, the use of spectral data provided by remote sensors allows having complete coverage of the territory at different spatiotemporal scales. Considering that the city of Asunción and its surroundings have had a high urban growth, the objective of the present investigation was to analyze the variation of the Terrestrial Surface Temperature (TST) and of the vegetation cover using the Normalized Differential Vegetation Index (IVN) in terms of area through a multitemporal analysis between the years 1986 and 2011. The methodology used was based on obtaining and processing Landsat 5TM satellite images and calculating the IVN



and TST. Therefore, it was possible to determine that in terms of area there was a variation in each of the categories of IVN and TST.

Keywords: satellite images, Landsat 5TM, vegetation cover, urban growth.

1. INTRODUCCIÓN

El acelerado proceso de urbanización experimentado por Paraguay en las últimas décadas ha tenido como foco al territorio en el que se ubica su capital, Asunción, la expansión urbana fue haciendo que la ciudad desborde los límites administrativos de dicha ciudad, absorbiendo progresivamente a los núcleos urbanos vecinos. Dando como resultado la mancha urbana continua que abarca en la actualidad a Asunción y a los municipios del Departamento Central ubicados a su alrededor ⁽¹⁾.

Este crecimiento modifica la distribución de la Temperatura de Superficie Terrestre (TST) y el aumento de áreas arboladas reduce el impacto ambiental que genera el proceso de urbanización regulando la temperatura, conservando energía, agua y mejorando la calidad del aire ^(2, 3). Por ello, existe relación entre la vegetación con la TST y la temperatura del aire ya que cuando se modifica la cobertura vegetal hay una disminución del calor solar ⁽⁴⁾.

El Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) es un indicador directo de la productividad primaria neta de biomasa sobre la superficie terrestre ⁽⁵⁾, este índice permite analizar los cambios en la biomasa del interior de la ciudad. La TST se define como la energía de onda larga que es emitida por la superficie terrestre. Los valores de este parámetro dependen de la composición de la superficie, de la humedad relativa, la rugosidad y el tamaño de los elementos ⁽⁶⁾.

La importancia de estudiar las temperaturas de la superficie terrestre y la cobertura vegetal radica en aportar conocimientos que pueden contribuir a mejorar el confort térmico en las ciudades para que sus habitantes puedan tener un ambiente más agradable.

El uso de datos espectrales provistos por sensores remotos para caracterizar el funcionamiento ecosistémico agrega una serie de ventajas, permite disponer de una cobertura completa del

territorio y el estudio de un mismo proceso funcional a distintas escalas espacio-temporales usando el mismo protocolo de observación ⁽⁸⁾.

Las principales ventajas de las imágenes del satélite Landsat proporcionadas por la NASA y el USGS (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>) son ⁽⁸⁾: (1) Alta resolución espacial (30m para bandas no térmicas y 120m para banda térmica, Landsat 5), lo que permite caracterizar la heterogeneidad funcional a escala fina; (2) captación de información multiespectral en longitudes de onda con alto significado funcional; y (3) disponibilidad de datos de más de 35 años, posibilitando estudios de cambio funcional mediante análisis retrospectivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Geográficamente la ciudad de Asunción, capital del Paraguay, está comprendida entre los paralelos 25° 15' y 25° 20' de latitud sur y entre los meridianos 57° 40' y 57° 30' de longitud oeste, es la ciudad más poblada del país (Figura 1). Está situada sobre la orilla izquierda del río Paraguay, que la separa al noroeste de la región Occidental y al sur del territorio argentino, frente a la confluencia de los ríos Pilcomayo y Paraguay; rodeada por el departamento Central, con el que limita al norte, este y sur. La ciudad de Luque limita al oeste con Asunción y al suroeste con Fernando de la Mora, siendo la ciudad más poblada del departamento Central. La ciudad de Fernando de la Mora, posee la superficie más pequeña y es la ciudad más densamente poblada de todo el Paraguay por hectárea. La ciudad de Lambaré es la sexta ciudad más poblada del país, limita al sur con el río Paraguay, al oeste y al este limita con la ciudad de Asunción ⁽⁹⁾.

El Área Metropolitana de Asunción (AMA), para fines del presente estudio, está comprendida por las ciudades de Asunción, Luque, Fernando de la Mora y Lambaré, y alcanzan una superficie total cercana a 328 km² ⁽⁹⁾.

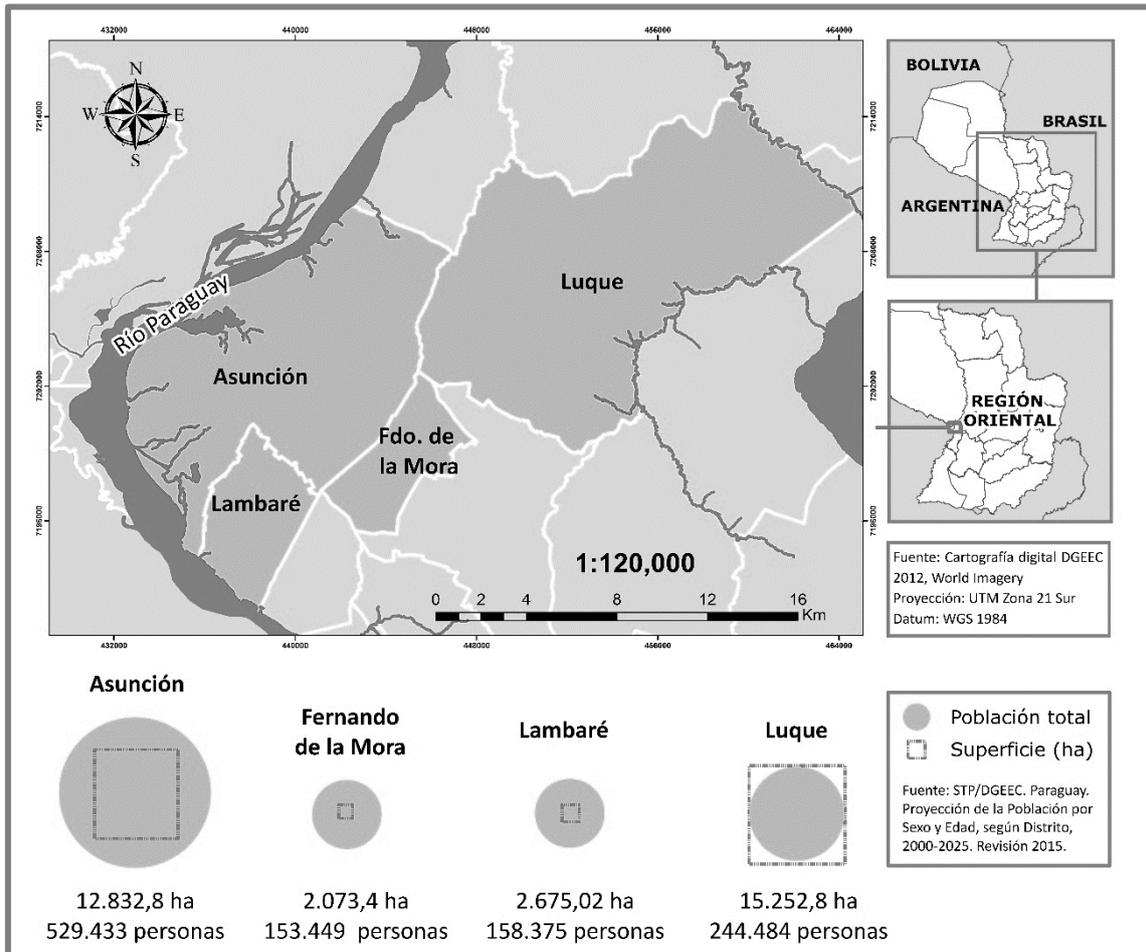


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

2.2 Datos de las imágenes del Satélite y procesamiento

Los datos de Thematic Mapper (TM), el sensor a bordo del satélite Landsat 5, son uno de los más utilizados para estudios ambientales, el TM está compuesto por siete bandas, seis de ellas en el visible e infrarrojo cercano, y una sola banda ubicada en la región infrarroja térmica ⁽¹⁰⁾.

A continuación, se señalan las finalidades de las diferentes bandas para estudios ambientales ⁽¹⁰⁾.

- La banda 1 (con longitud de onda central de 0,49 μm), el TM1, se usa para estudios de aguas costeras,
- TM2 (0,56 μm) se usa para identificación de cultivos y estudios de etapas de vegetación,
- TM3 y TM4 (0,66 y 0,83 μm , respectivamente) son usado para calcular índices de vegetación, como el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN),

- TM5 y TM7 (1.65 y 2.22 μm , respectivamente) se puede usar para nubes, hielo, nieve y discriminación de formaciones geológicas,
- y finalmente la banda TM6 (con una longitud de onda efectiva de 11.457 μm) se utiliza para la recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST).

Para la presente investigación, se consideraron las siguientes variables funcionales: Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) por lo cual se utilizaron las bandas 3 y 4 y la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) utilizando la banda 6, estimados a partir de datos de teledetección, adoptando el período 1986 y 2011 para observar las posibles transformaciones funcionales espacio-temporales.

Mediante la utilización de la plataforma ArcGIS Desktop 10.5 para el procesamiento y extracción de este tipo de imágenes para el área metropolitana de Asunción, se hallaron las variables funcionales, el IVN y la TST, utilizando la herramienta raster calculator (calculadora raster), que se encuentra incluida dentro del Map algebra (álgebra de mapas) del Spatial Analyst tools (herramienta de análisis espacial) contenida dentro del toolbox (caja de herramientas) en ArcGis Desktop 10.5, la cual da como resultado o producto una dataset raster (conjunto de datos raster).

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5TM capturadas en las estaciones de verano e invierno para llevar a cabo la comparación de la TST espacio-temporal entre el año 1986 y 2011 (fechas de las imágenes: 29/12/1986, 13:07 horas; 07/08/1986, 13:09 horas; 16/01/2011, 13:37 horas y 12/08/2011, 13:36 horas). Con respecto al IVN, la primavera es el momento en el que la vegetación comienza a crecer y, por ende, el período más adecuado para estudiarla con imágenes Landsat ⁽¹¹⁾ (fechas de las imágenes: 26/10/1986, 27/09/1993, 03/10/1999, 15/11/2005 y 31/10/2011). En todos los casos se seleccionaron imágenes libres de nubes.

El protocolo de procesamiento hasta obtener los parámetros funcionales incluyó los siguientes pasos ⁽¹²⁾:

2.2.1 Pre-procesamiento de la imagen

A. Cálculo de radiancia ⁽¹³⁾

En datos de teledetección en bruto, cada píxel tiene un valor de número digital que corresponde a una medida sin procesar adquirida por el sensor.

Para obtener información cuantitativa de las imágenes, el número digital se debe convertir en cantidades físicas, radiancia y temperatura de brillo para este estudio. Por lo tanto, es necesario corregir las imágenes previamente calibradas por los efectos atmosféricos. La presencia de la atmósfera puede causar distorsiones significativas en la señal radiométrica. Los productos estándar Landsat TM5 consisten en un número digital de escala cuantificado y calibrado que representa datos de imágenes multiespectrales. Las imágenes se pueden convertir en radiaciones en el Techo de la Atmósfera (Top of Atmosphere, *sus siglas en inglés TOA,*) usando la siguiente expresión:

$$L\lambda = (LMAX\lambda - LMIN\lambda / Qcalmax - Qcalmin) (Qcal - Qcalmin) + LMIN\lambda \quad (1)$$

Donde:

$L\lambda$: Radiancia espectral en la entrada del sensor [Watts / (m² sr μm)].

Qcal: Valor de píxel calibrado cuantificado en número digital (ND).

Qcalmin: Valor mínimo de píxel calibrado cuantificado correspondiente a $LMIN\lambda$ en ND el cual es igual a 1.

Qcalmax: Valor máximo de píxel calibrado cuantificado correspondiente a $LMAX\lambda$ en ND el cual es igual 255.

$LMAX\lambda$: irradiación espectral correspondiente a Qcalmax [Watts / (m² sr μm)].

$LMIN\lambda$: irradiación espectral correspondiente a Qcalmin [Watts / (m² sr μm)].

Los dos últimos parámetros se obtuvieron a partir de la información proporcionada en la cabecera de las imágenes.

Debido a que la $L\lambda$ no considera los efectos atmosféricos, es necesario convertir las imágenes de radiancia a medidas de reflectancia, teniendo en cuenta los efectos de corrección atmosférica. Para tal objetivo, se utilizan dos enfoques diferentes, los métodos basados en imágenes y un

modelo de transferencia radiativa. Los enfoques basados en imágenes más utilizados se conocen como DOS (Dark Object Subtraction) y en este estudio se considera el modelo DOS-1.

DOS-1 se aplica solo a datos de imágenes multispectrales. Las principales ventajas de los modelos DOS son que se trata estrictamente de un procedimiento basado en imágenes y no requiere mediciones de campo in situ. DOS-1 supone que solo algunos píxeles están en completa sombra en la imagen y sus radiancias en el sensor se deben a la dispersión atmosférica. Esta suposición se combina con el hecho de que pocos objetos en la superficie de la Tierra son negros absolutos (objetos oscuros), por lo que se supone una reflectancia mínima del uno por ciento mejor que el cero por ciento. Los pasos para la corrección atmosférica se detallan a continuación:

B. La corrección atmosférica de las bandas TM3 y TM4 para el cálculo del IVN ⁽¹⁴⁾:

De acuerdo a Sobrino *et al.* (2004), es posible obtener valores de IVN a partir de la reflectividad en el Techo de la Atmósfera (TOA), llamada IVN_{TOA} . Sin embargo, señala es más correcto obtener la reflectividad en la superficie y, de esta manera, estimar los valores de IVN más representativo en las superficies naturales, llamada IVN_{sup} .

El método propuesto ^(10, 14) (el modelo DOS-1 radiancia a reflectancia) para llevar a cabo la corrección atmosférica presenta una gran ventaja, los datos necesarios se obtienen de la misma imagen. Para este propósito, la reflectividad en la superficie se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\rho_{sup} = \pi (L\lambda - L_p) d^2 / E_{SUN\lambda} \cos \theta_z T_z \quad (2)$$

Donde:

ρ_{sup} : La reflectancia de la superficie.

$L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor.

d : Distancia Tierra-Sol.

$E_{SUN\lambda}$: Irradiancia media solar en el Techo de la Atmósfera.

θ_z : Ángulo cenital solar.

T_z : Transmisividad atmosférica entre el sol y la superficie

L_p : Es la Radiancia resultado de la interacción de la Radiancia electromagnética con los componentes atmosféricos (moléculas y aerosoles) que se puede obtener de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L_p = L_{\min} - L_{1\%} \quad (3)$$

Donde:

L_{\min} : Es la Radiancia que corresponde a un valor de conteo digital para el cual la suma de todos los píxeles con conteos digitales menores o iguales a este valor es igual a 0.01% de todos los píxeles de la imagen considerada. El término $L_{1\%}$ es el resplandor del objeto oscuro y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$L_{1\%} = 0.01 \cos \theta_z T_z E_{\text{SUN}\lambda} / \pi d^2 \quad (4)$$

con valores de T_z de 0.85 para la banda TM3 y 0.91 para la banda TM4 ⁽¹⁴⁾.

2.2.2 Obtención de la temperatura de la superficie terrestre (TST)

A. Cálculo de la temperatura de brillo ⁽¹³⁾

El siguiente paso es convertir la radiancia espectral a la temperatura de brillo a partir de la banda térmica. La temperatura de brillo del sensor asume que la superficie de la Tierra es un cuerpo negro (es decir, la emisividad espectral es 1) e incluye los efectos atmosféricos (absorción y emisiones). La temperatura en el sensor usa las constantes de calibración, $K1 = 607.76$ [Watts / (m² sr μm)]. $K2 = 1260.56$ (Kelvin). La fórmula de conversión de la radiancia espectral del sensor a la temperatura de brillo del sensor está dada por la siguiente ecuación:

$$T_b = K2 / \ln (K1 / L\lambda + 1) \quad (5)$$

Donde:

T_b : Es la temperatura de brillo efectiva en el sensor [K].

$K1$: Es la constante de calibración, 607.76 [Watts / (m² sr μm)].

K_2 : Es la constante de calibración, 1260.56 [K].

L_λ : Radiancia espectral en el sensor.

\ln : Logaritmo natural.

B. Cálculo de IVN a partir de las correcciones atmosféricas estimada en las bandas 3 (R) y 4 (IR) ⁽¹⁰⁾

Varios índices espectrales han sido propuestos como estimadores de la presencia y condición de la vegetación, sin embargo, el Índice de Vegetación Normalizado (o Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ha sido y es el más usado. El IVN integra dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos: la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila) y la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesofilo de las hojas) ⁽⁷⁾. El IVN se calcula como ⁽¹⁵⁾:

$$IVN = (IRC - R) / (IRC + R) \quad (6)$$

Donde:

IRC: La reflectancia en la banda infrarrojo cercano

R: La reflectividad en la banda roja

Este índice es un estimador lineal de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes (fRFAA) ⁽⁷⁾.

C. Estimación de la emisividad de la superficie terrestre a partir del IVN ⁽¹⁰⁾

El método propuesto ⁽¹⁰⁾ obtiene los valores de emisividad del IVN considerando tres diferentes casos:

(a) $IVN < 0.2$

En este caso, el píxel se considera como suelo desnudo y se supone un valor constante de 0.97 para la emisividad.

(b) $IVN > 0.5$

Los píxeles con valores de IVN superiores a 0,5 se consideran como vegetación densa, y se supone un valor constante para la emisividad, generalmente de 0,99.

(c) $0.2 \leq IVN \leq 0.5$

En este caso, el píxel está compuesto por una mezcla de suelo desnudo y vegetación, la cual fue utilizada para el presente trabajo, y la emisividad se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon \quad (7)$$

Donde:

ε : Es la emisividad de la vegetación.

ε_s : Es la emisividad del suelo.

$d\varepsilon$: incluye el efecto de la distribución geométrica de las superficies naturales y también las reflexiones internas (por ej., bosque). Este término se calcula con la siguiente expresión:

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v) F \varepsilon_v \quad (8)$$

En esta ecuación, F es un factor de forma ^(10, 16) y supone un valor medio de 0,55, suponiendo distribuciones geométricas diferentes.

P_v : Es la proporción de la vegetación ^(10, 17) y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_v = (IVN - IVN_{\min} / IVN_{\max} - IVN_{\min})^2 \quad (9)$$

Donde $IVN_{\max} = 0.5$ y $IVN_{\min} = 0.2$.

La expresión final para la emisividad (Sobrinó *et al.*, 2004) viene dada por:

$$\varepsilon = 0.004 P_v + 0.986 \quad (10)$$

D. Cálculo de la temperatura de la superficie terrestre (TST)

Las temperaturas de la superficie terrestre corregidas por la emisividad espectral (ε) se calculan de la siguiente manera ⁽¹⁸⁾:

$$TST = Tb / (1 + (\lambda Tb / \rho) \ln(\varepsilon)) \quad (11)$$

Donde:

λ : Es la longitud de onda de la radiancia emitida (11.45 μm).

ε : Es la emisividad de la superficie.

$\rho = hc/\sigma$ (1.438×10^{-2} mK), σ es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} Js⁻¹), c es la velocidad de la luz (2.998×10^8 ms⁻¹).

La temperatura de brillo y de superficie, en grados Celsius, se calcula restando 273.15 a la temperatura de la ecuación 5 y ecuación 11, respectivamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Temperatura de la Superficie Terrestre en el AMA

La Figura 2 representa a las TST obtenidas para la estación de verano del año 1986 correspondiente a la fecha de 29 de diciembre, donde se observa la existencia de una variedad de temperaturas distribuidas en toda el área de estudio.

La zona altamente urbanizada de la ciudad de Asunción se caracterizó por contar con temperaturas mayores, portando la gama de colores de anaranjados a rojo, distribuyéndose a las zonas menos urbanizadas con temperaturas menores en la gama de colores celestes. La zona este de la ciudad de Luque, presentó mayor presencia de temperaturas bajas, entre la gama de color celeste, ya que esta zona estuvo bajamente urbanizada en la fecha de estudio, con presencia de mayor cobertura correspondiente a vegetación.

La estación meteorológica de Asunción-Aeropuerto Silvio Pettirossi, ubicada al noreste de la ciudad de Luque, registró una temperatura máxima del aire de 32,4°C y una temperatura mínima del aire de 19,8°C para la mencionada fecha. En la Figura 2, se puede observar que dicha estación, es una de las regiones que mayores valores alcanza en la TST.

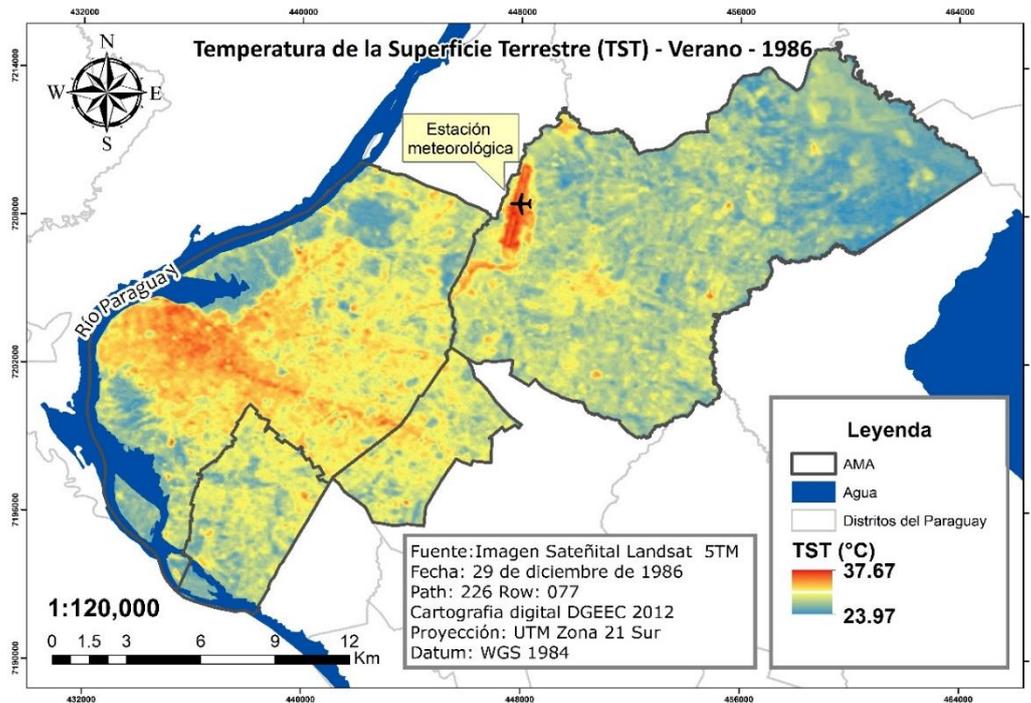


Figura 2: Temperatura Superficial Terrestre (TST) en el AMA, verano del año 1986.

La Figura 3 representa a la TST obtenida para la estación de verano del año 2010 correspondiente a la fecha 15 de diciembre, presentando una alta variabilidad de temperaturas distribuidas en toda la región. En comparación con el verano de 1986 (Figura 2), se observa que en ambas fechas la TST alcanzó una temperatura máxima de 37,67°C, sin embargo, en el 2010 se distingue una expansión de las temperaturas más altas, que abarca gran parte de la ciudad de Asunción expandiéndose hacia el sur de la misma alcanzando la ciudad de Lambaré, y al oeste correspondiente a la ciudad de Fernando de la Mora, portando la gama de colores de anaranjados a rojo en gran medida. Así mismo, la ciudad de Luque presentó cambios en la TST, habiendo una expansión de los núcleos urbanos, produciendo un aumento en la TST.

La estación meteorológica de Asunción-Aeropuerto Silvio Pettirossi, registró una temperatura máxima del aire de 29,8°C y una temperatura mínima del aire de 14,6°C para la mencionada fecha. En la Figura 3, se puede observar que dicha estación, es una de las regiones que mayores valores alcanza en la TST, superando los 37°C.

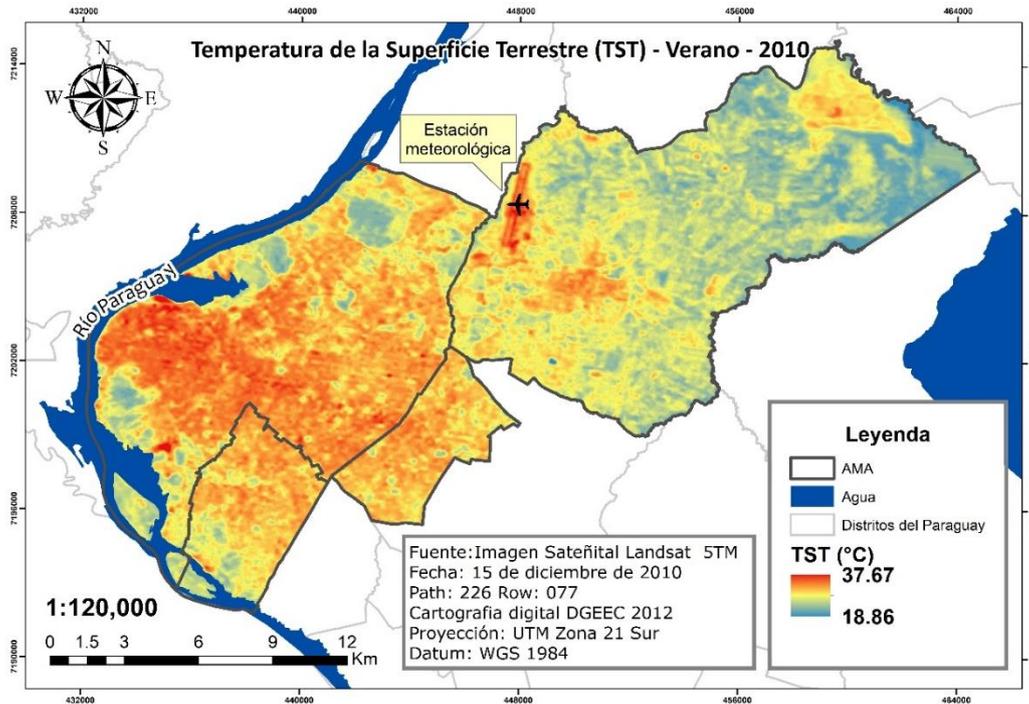


Figura 3: Temperatura Superficial Terrestre (TST) en el AMA, verano del año 2010.

La Figura 4 representa a la TST obtenida para la estación de invierno del año 1986 correspondiente a la fecha 07 de agosto de la zona de estudio, donde se observó la variabilidad de temperaturas distribuidas en toda la zona.

Se observa que la zona altamente urbanizada de la ciudad de Asunción presentó con temperaturas mayores, portando la gama de colores del rojo y anaranjado. Las ciudades aledañas presentaron temperaturas levemente menores con respecto a la ciudad de Asunción, entre la gama de los colores amarillo y celeste en gran medida. Sin embargo, la zona del Aeropuerto contaba con las temperaturas más altas, presentando la gama de colores del anaranjado a rojo.

La estación meteorológica del Aeropuerto Silvio Pettrossi contó con registros para la fecha de la imagen de una máxima de 31,4 °C y una mínima de 21,2 °C. Por lo tanto, la temperatura del aire fue superior a la temperatura de la superficie terrestre en dicha zona, ya que en la estación meteorológica se obtuvieron valores que no superan los 25,26°C.

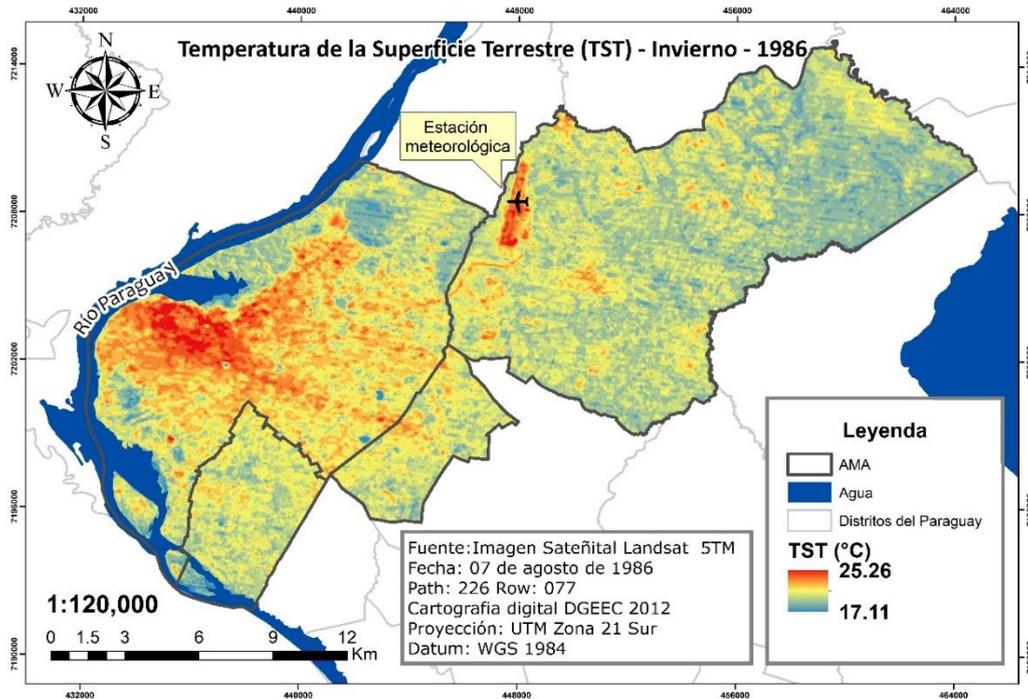


Figura 4: Temperatura Superficial Terrestre (TST) en el AMA, invierno del año 1986.

La Figura 5 representa a la TST obtenida para la estación de invierno del año 2011 correspondiente a la fecha 12 de agosto, donde las altas TST estuvieron distribuidas en gran parte de la zona bajo estudio.

En contraste con el invierno de 1986 (Figura 4), la TST del invierno de 2011 fue más alta, dando un aumento de aproximadamente 3,8°C. Se distingue una expansión de las temperaturas más altas, que abarca gran parte de la ciudad de Asunción expandiéndose hacia el sur de la misma alcanzando la ciudad de Lambaré, y al oeste correspondiente a la ciudad de Fernando de la Mora, portando la gama de colores de anaranjados a rojo en gran medida. Así mismo, la ciudad de Luque presentó cambios en la TST, habiendo una expansión de los núcleos urbanos, produciendo un aumento en la TST en gran parte de la ciudad, los menores valores se obtuvieron al este.

La estación meteorológica del Aeropuerto Silvio Pettirossi, registró una temperatura máxima del aire de 33,4°C y una temperatura mínima del aire de 23°C para la mencionada fecha. Sin embargo, la temperatura del aire fue superior a la temperatura de la superficie terrestre en dicha zona, ya que en dicha zona se obtuvieron valores que no superaron los 25,26°C de la TST.

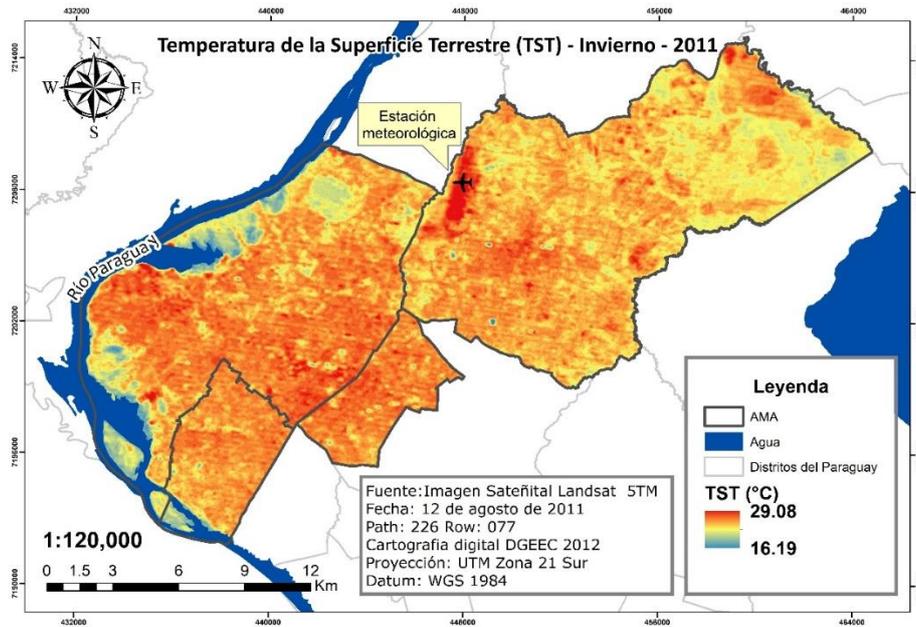


Figura 5: Temperatura Superficial Terrestre (TST) en el AMA, invierno del año 2011.

En todas las fechas analizadas se obtuvieron altas TST en la zona de la estación meteorológica del aeropuerto. Al respecto, los materiales de construcción ejercen un papel importante para la retención o liberación de calor de las construcciones, las áreas sin vegetación presentaron valores altos de la TST como la de superficies iluminadas por el sol (suelo desnudo o pavimentado) ⁽¹⁹⁾.

Es importante destacar que el comportamiento de la TST está influenciado por las condiciones micro-climáticas relacionadas con la estructura urbana, el uso del suelo, la morfología y su orientación ⁽²⁰⁾.

La distribución de la TST entre los años 1989 y 2011 fue diferente. Entre 1986 y 2011 se acentuaron las diferencias de la TST entre las áreas construidas y las periferias, con la expansión de las altas TST desde el centro de la ciudad de Asunción llegando a las ciudades aledañas en el 2011. El mayor contraste fue en el invierno y los menores en verano. Las diferencias estacionales de los valores de TST están determinadas por la latitud, el período de insolación diferente según la estación del año y a la diferencia estacional de la radiación incidente ⁽²⁰⁾.

3.2 El Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el AMA

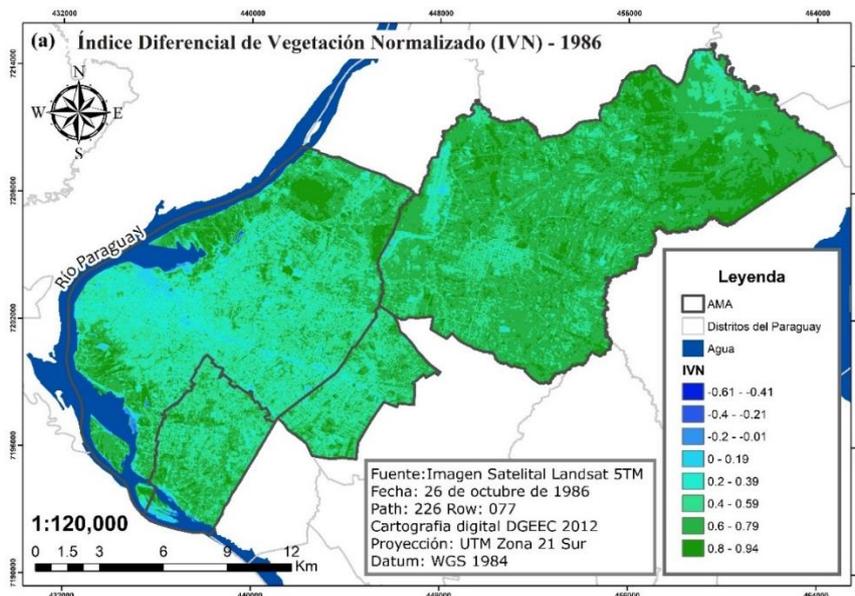
Los resultados demuestran que la intensidad de la vegetación era mayor en 1986, disminuye en el año 1993, pero vuelve a subir en el año 2005 con respecto a 1999 (Tabla 1). Esto se debe a que este promedio no estima la cantidad de vegetación que existe en una zona sino su intensidad,

por lo que es perfectamente posible que en el año 2005 la vegetación estuviera más sana o madura que en 1999, pero no que hubiera mayor porcentaje.

Tabla 1: Media del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el AMA.

Fecha	Media
26/10/1986	0,566350997
27/09/1993	0,51991309
03/10/1999	0,46444639
15/11/2005	0,511873721
31/10/2011	0,496406984

A continuación, se compararon los resultados obtenidos con el cálculo del IVN. Comparando las imágenes de la Figura 6, se aprecia la disminución de las áreas verdes urbanas en un periodo de 24 años, estas áreas han sido reemplazadas progresivamente por tejido urbano. Los valores de IVN fueron menores en la zona urbanizada que en sus alrededores. Esto podría indicar una relación con la extensión de las sombras, con las características físicas de los materiales de construcción, con el volumen del área construida y con la disminución de la cobertura vegetal. El cambio de los suelos con coberturas vegetales a suelos pavimentados ocasiona una variación en la capacidad de almacenamiento térmico, dando como resultado una transformación que puede ser significativa para el área urbana en relación a su entorno ⁽²¹⁾. La ausencia de vegetación altera la distribución espacial de la energía y de la humedad relativa que se desprende de los edificios durante la noche ocasionando una fuente artificial de calor que da lugar a la formación de islas de calor ⁽³⁾.



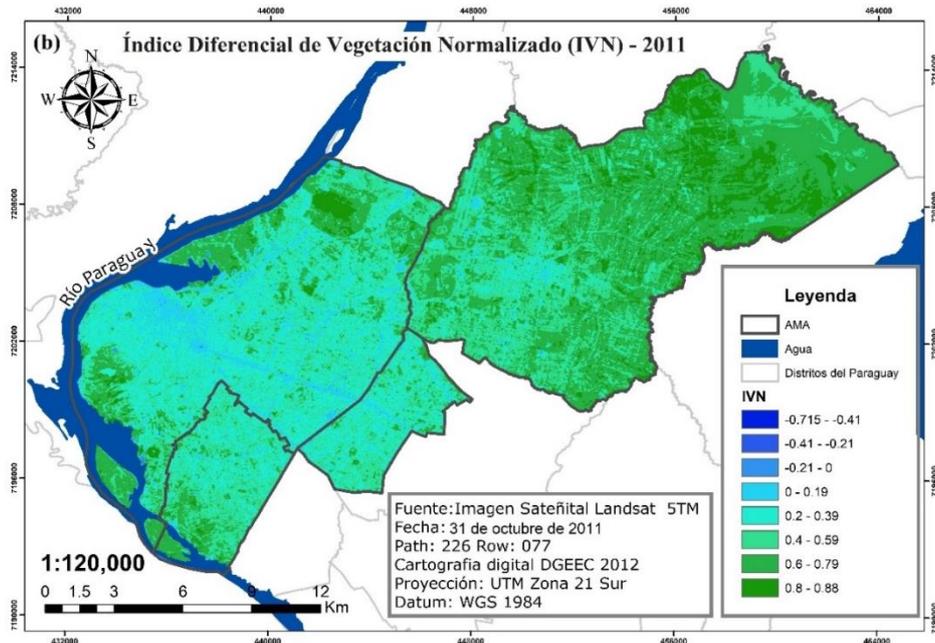


Figura 6: Distribución espacial y temporal del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el AMA, la imagen (a) corresponde a la fecha 26 de octubre de 1986, la imagen (b) corresponde a la fecha 31 de octubre de 2011.

4. CONCLUSIONES

El crecimiento urbano del AMA durante los 24 años analizados generó un impacto en la TST y el IVN. Las temperaturas de 2011 y 1986 variaron en relación con la densidad de edificaciones y la expansión del área construida y la disminución de zonas con vegetación. Es decir, en las zonas urbanizadas se presentaron las TST más altas y las zonas con menor temperatura fueron las áreas con cobertura vegetal. Por otro lado, las mediciones de verano registraron diferencias considerables entre sí, aunque la temperatura en ambos años alcanzó 37,7°C, la expansión de la TST pudo observarse en el 2011, en verano las TST superaron a las temperaturas máximas del aire. Por otro lado, considerando el invierno, la TST se observó una expansión y un aumento de la TST de aproximadamente 4°C.

Probablemente el cambio de uso del suelo, de zonas de vegetación a zonas de construcción sea una de las causas del incremento y expansión de la TST, impulsadas por una elevada densidad poblacional y aumento elevado de edificaciones en el AMA, esto podría causar un impacto significativo desde el punto de vista de confort.

Las zonas urbanizadas tienen una temperatura superficial de alrededor de 7 a 12°C mayor a la de las zonas con cobertura vegetal. Demostrando de esta manera que la diferencia en la TST entre las distintas estructuras tiene un valor considerable, principalmente en cuanto al confort térmico nos referimos, ya que, dentro de las instalaciones como viviendas u oficinas, una temperatura superficial

mayor acrecentará la temperatura interna de estas estructuras, obligando de esta manera a utilizar más los equipos de aire acondicionado, con el fin de mantener las condiciones óptimas.

Los impactos de la TST, que se presentan por el mayor calentamiento de las superficies duras y zonas construidas, continuarán teniendo un impacto sobre la calidad de vida los habitantes. Para mitigar estos impactos se presentan a continuación estrategias utilizadas alrededor del mundo ⁽²²⁾:

Los *techos y muros verdes* son en síntesis una capa vegetal que crece sobre el techo o muro de una edificación. Al proveer a la estructura con una sombra contra los rayos del sol y por medio de la evapotranspiración, las plantas sobre estas estructuras pueden enfriar tanto la temperatura superficial como atmosférica ⁽²²⁾.

La *arborización*, así como los techos y muros verdes, los árboles y otro tipo de vegetación en las zonas urbanas ayudan a mantener la temperatura más baja por medio de la sombra y la evapotranspiración. En la presente investigación se pudo observar que las zonas con alto índice de vegetación evidentemente tenían una menor temperatura. Los árboles ayudan a absorber y reflejar gran parte de la radiación solar antes de que alcance la superficie, logrando que llegue solo entre el 10 y el 30 % de la que lo hace normalmente ⁽²²⁾.

Además de las estrategias mencionadas, los científicos han logrado identificar varias estrategias para mitigar el calor en las edificaciones. Probablemente en el AMA, la aplicación de algunas estrategias como los techos verdes, muros verdes y arborización con especies nativas e idóneas para la ciudad, no solo aumentaría el confort térmico sino aumentaría la calidad del aire y el embellecimiento del paisaje.

AGRADECIMIENTOS

A Jazmín Rocío Ofelia Caballero Prieto, por su apoyo constante en esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

CC y VD han trabajado en la búsqueda de literatura, recolección de datos, análisis de los resultados y en la redacción del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BID, Banco Interamericano de Desarrollo. Iniciativa de ciudades emergentes y sostenibles: Plan de acción Área Metropolitana de Asuncion Sostenible; 2014.
2. Wong N, Yu C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*; 2005. 29: 547-558.
3. Capelli de Steffens A, Piccolo MC, Campo de Ferrera A. Clima urbano de Bahía Blanca. Editorial Dunken, Buenos Aires, Argentina; 2005.

4. Dimoudi A, Nikopoulou M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*; 2003. 35: 69-76.
5. Prince SD. High Temporal Frequency Remote Sensing of Primary Production using NOAA AVHRR. En: Steven, M.D., Clark, J.A. (Eds.), *Applications of remote sensing in agriculture*; 1990. pp: 427. Butterworths, London, UK.
6. Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas, *Remote Sensing of Environment*; 1996. vol.57(3), pp. 167–184.
7. Paruelo, JM. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*; 2008. 17(3):4-22.
8. Fernández N, Piñeiro G. La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales; 2008. *Ecosistemas* 17(3):64-78.
9. DGEEC, Instituto Nacional de Estadística. *Proyección de la Población por Sexo y Edad, según Distrito, 2000-2025. Revisión 2015*. Fernando de la Mora, Paraguay, 583 págs.
10. Sobrino JA, Jiménez-Muñoz JC, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of Environment*; 2004. vol.90(4), pp. 434–440.
11. Lo CP, Quattrochi DA. Land-use and Land-cover change, urban heat island phenomenon, and health implication: a remote sensing approach. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*; 2003. 69: 1053-1063.
12. Giannini MB, Belfiore OR, Parente C, Santamaria R. Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data. *Journal of Engineering Science and Technology Review*; 2015. 8 (3). 83-90
13. Chander G, Markham BL, Helder DL. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ nad EO-1 ALI sensor. *Remote Sensing of Environment*; 2009. 113, pp 893-903.
14. Chavez PS. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*; 1996. vol.62(9), pp. 1025-1036.
15. Rouse JW, Haas JRH, Schell JA, Deering DW. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station; 1973. 93p. NTIS No. E73-106393.
16. Sobrino JA, Caselles V, Becker F, “Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*; 1990. vol. 44, pp. 343–354.
17. Carlson, TN, Ripley DA. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*; 1997. 62, 241– 252.
18. Artis, D.A., and Carnahan, W.H. Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas. *Remote Sensing of Environment*; 1982. 12, 313-329.
19. Weng, Q., Lu, D. y Shubring, J. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*; 2004. 89: 467-483.
20. López Gómez A., Moreno Jiménez, A., Fernández García, F. y Palou, F. La temperatura diurna en la Aglomeración de Madrid, mediante imágenes remotas. *Revista de Estudios Geográficos*; 1990. 201: 705-732.
21. Luber G, McGeehing M. Climate change and Extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*; 2008. 35: 429-435.
22. EPA. *Urban Heat Island*. Washington D.C.; 2011.