

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**ISLAS DE CALOR URBANO: EFECTO DEL CRECIMIENTO
NO PLANIFICADO DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD
DE JAÉN, CAJAMARCA (1995 -2015)**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

**Autores: Bach. García Vásquez Wilder
Bach. Rivera Montalvan Xiomi Estefani**
Asesor: M.Sc. Elera Gonzales Duberlí

JAÉN- PERÚ, FEBRERO, 2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**ISLAS DE CALOR URBANO: EFECTO DEL CRECIMIENTO
NO PLANIFICADO DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD
DE JAÉN, CAJAMARCA (1995 -2015)**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

**Autores: Bach. García Vásquez Wilder
Bach. Rivera Montalvan Xiomi Estefani**

Asesor: M.Sc. Elera Gonzales Duberlí

JAÉN- PERÚ, FEBRERO, 2020



ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 19 de febrero de 2020, siendo las 18:00 horas, se reunieron los **Miembros del Jurado Evaluador**:

- Mg. Mario Ruíz Ramos Presidente
- Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo Secretaria
- Mg. María Marleny Torres Cruz Vocal

Para evaluar la sustentación del Informe Final de Tesis titulado: ISLAS DE CALOR URBANO: EFECTO DEL CRECIMIENTO NO PLANIFICADO DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE JAÉN , CAJAMARCA (1995-2015); cuyos autores son los bachilleres García Vásquez Wilder y Rivera Montalvan Xiomí Estefani de la Carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental; ha sido dictaminado como:

() Aprobado () Desaprobado () Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

Excelente	18, 19, 20	()
Muy Bueno	16, 17	(<input checked="" type="checkbox"/>)
Bueno	14, 15	()
Regular	13	()
Desaprobado	12 o menos	()

En concordancia con el Reglamento General de Grado Académico y Título Profesional de la Universidad Nacional de Jaén aprobado con Resolución N° 220-2019-CO-UNJ el 18 de junio de 2019.

Siendo las 19:00 horas del mismo día, los Miembros del Jurado Evaluador concluyen el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Jaén, 19 de Febrero de 2020

Secretaria Jurado Evaluador
Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

Presidente Jurado Evaluador
Mg. Mario Ruíz Ramos

Vocal Jurado Evaluador
Mg. María Marleny Torres Cruz

ÍNDICE

RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivo General.....	11
2.2. Objetivos Específicos.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1. Ubicación del área de estudio.....	12
3.1.1. Localización y área de estudio.....	12
a) Ubicación Geográfica.....	12
b) Ubicación política.....	12
3.2. Materiales.....	14
3.2.1. Bases de datos	14
3.2.2. Equipos y software	15
3.3. Métodos	16
3.3.1. Mapeo de vegetación urbana de la ciudad de Jaén	16
3.3.2. Delimitación de áreas verdes urbanas.....	16
3.3.3. Índice de áreas verdes (IVA).....	17
3.3.4. Obtención de temperatura de la superficie terrestre.....	19
3.3.4.1. Pre procesamiento Landsat TM5.....	22
3.3.4.2. Preprocesamiento Landsat TM 8.....	28
3.3.4.3. Procesamiento imágenes Landsat TM.....	31
3.3.4.4. Determinación del índice de acumulación de diferencia normalizada (NDBI).	
.....	32
3.3.4.5. Valoración ecológica de la ciudad.....	32

3.3.4.6.	Análisis estadístico.....	33
a.	Análisis estadístico.....	33
IV.	RESULTADOS.....	34
4.1.	Delimitación de la vegetación urbana de la ciudad Jaén.	34
4.2.	Índice de áreas verdes (IVA).	36
4.3.	Distribución de isla de calor urbana en la ciudad de Jaén.	36
4.4.	Evaluación ecológica de las islas de calor.....	45
4.5.	Estimación Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI).....	53
4.5.2.	Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST.	53
4.6.	Análisis de correlación entre la temperatura de la superficie de la tierra (Ts), NDVI y NDBI.	55
V.	DISCUSIÓN.....	57
	CONCLUSIONES.....	60
	RECOMENDACIONES.....	60
	ANEXOS.....	67

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Mapa de Ubicación.	13
Figura 2. Esquema representativo de urbanización.	18
Figura 3. Ubicación de estación meteorológica Jaén.	20
Figura 4. Esquema de metodología de estudio.	21
Figura 5. Mapa de la vegetación urbana de la ciudad de Jaén.....	34
Figura 6. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 1995 y 2015.	38
Figura 7. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 1995	39
Figura 8. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2000	40
Figura 9. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2005	41
Figura 10. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2011	42
Figura 11. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2015.	43
Figura 12. Proporción de la distribución de las clases de temperatura de la superficie de la tierra entre los años 1995-2015, para ciudad de Jaén.	44
Figura 13. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén.....	46
Figura 14. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 1995.....	47
Figura 15. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2000.....	48
Figura 16. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2005.....	49
Figura 17. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2011.Figura 18. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2015.	50
Figura 19. Proporciones de evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén entre 1995 y 2015.	52
Figura 20. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST 1995	54

Figura 21. Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre la temperatura de la superficie terrestre (TST), NDVI, NDBI para la ciudad de Jaén, entre 1995 hasta 2015.	56
Figura 22. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST 2000.	68
Figura 23. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2005	69
Figura 24. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2011.	70
Figura 25. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2015.	71

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Lista de archivos de polígonos.	14
Tabla 2. Datos de imágenes satelitales Landsat TM5 y TM8.	15
Tabla 3. Polígonos y representación de vegetación urbana de la ciudad de Jaén.....	17
Tabla 4. Datos de Variables Meteorológicas - SENAMHI	19
Tabla 5. Estimación de la Emisividad utilizando el valor del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	25
Tabla 6. Estimación de la transmitancia atmosférica	26
Tabla 7. Estimación de la temperatura atmosférica media efectiva.	27
Tabla 8. Estimación de la Emisividad utilizando el valor del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	31
Tabla 9. Clasificación de la temperatura superficial de la tierra.	31
Tabla 10. Valores límite del índice de evaluación ecológica.	33
Tabla 11. Cuantificación y el porcentaje (%) de clases de vegetación en la ciudad de Jaén.	35
Tabla 12. Temperaturas estimadas para la ciudad de Jaén en °C.....	36
Tabla 13. Valores promedio de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) 1995 a 2015.	53
Tabla 14. Valores del coeficiente de correlación de Pearson.	55

RESUMEN

La urbanización genera un impacto significativo en la formación de las islas de calor urbano (ICU), debido a que las áreas verdes son reemplazadas por construcciones. El objetivo fue determinar la isla de calor urbano y su efecto del crecimiento no planificado del área urbana de la ciudad de Jaén en el período de 1995 a 2015. Se delimitaron áreas verdes urbanas; correcciones de bases de datos y aplicación del algoritmo de *mono-window* para determinación y obtención de temperatura de la superficie de la tierra (TST) y su fotointerpretación. Se aplicó índice de evaluación ecológica; estimación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) e índice de diferencia normalizada edificada (NDBI). Se correlacionó TST, (NDVI) y NDBI. Los valores medios de TST en áreas urbanas fueron 3 a 6 °C más altos que en áreas no urbanizadas con presencia de vegetación. El índice de evaluación ecológica mostro disminución de áreas verdes. Hubo correlación negativa entre TST y NDVI, indicando que las áreas verdes o la vegetación pueden suavizar o reducir el efecto de la ICU. Hubo correlación positiva entre NDBI y TST. Los resultados de esta investigación muestran que las áreas construidas influyen fuertemente en la aparición de las ICU.

Palabras claves: Islas de calor urbano, temperatura de la superficie de la tierra.

ABSTRACT

Urbanization generates a very significant impact on the formation of urban heat islands (UHI), because green areas are replaced by buildings. The objective was to determine the urban heat island and its effect of the unplanned growth of the urban area in different periods of time in the city of Jaén. Urban green areas were delimited; Database corrections and application of the mono-window algorithm for determination and obtaining of the land surface temperature (LST) and its photointerpretation. Ecological evaluation index was applied; estimation of the standardized difference vegetation index (NDVI) and built-in standardized difference index (NDBI). LST, (NDVI) and NDBI were correlated. The average values of LST in urban areas were 3 to 6 ° C higher than in undeveloped areas with vegetation. The ecological evaluation index showed a decrease in green areas. There was a negative correlation between LST and NDVI, indicating that green areas or vegetation can soften or reduce the effect of the UHI. There was a positive correlation between NDBI and TST. The results of this research show that the built areas strongly influence the appearance of UHI.

Keywords: Islands of urban heat, Land Surface Temperature.

I. INTRODUCCIÓN

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (2016), Jaén es una ciudad tropical que en los últimos años ha mostrado un crecimiento poblacional acelerado, urbanizando áreas que antes eran rurales. Estudios del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) muestran que la ciudad de Jaén ha experimentado el aceleramiento de áreas urbanas, que ha dado lugar a la pérdida de áreas verdes importantes, la misma que influencia en el incremento de la sensación térmica local, en especial durante la última década (Velásquez, 2016).

El crecimiento desordenado urbano ocasiona daños en el medio ambiente y en los sistemas ecológicos, una consecuencia es la isla de calor urbano (ICU), la cual se define como la diferencia térmica entre el área urbana y sus alrededores (Galindo, 2010).

La isla de calor urbano está relacionada con la distribución espacial de la temperatura de la superficie de la tierra (TST), que se preside por los flujos de calor de la superficie y obviamente se ve afectada por la urbanización (Dousset & Gourmelon, 2003; Sun *et al.*, 2010; dos Santos *et al.*, 2017). Por lo tanto, para analizar y determinar las ICU es fundamental estimar en primer lugar la temperatura de la superficie de la tierra (TST). Los valores medios de temperatura de la superficie de la tierra (TST) en áreas urbanas son al menos 2,34 a 7,19 °C más altas que las áreas no urbanizadas; que incluso puede llegar a ser mayor, mostrando así un importante efecto de isla de calor urbano. Un área muy pequeña de tierra verde urbana (cobertura de fracción de vegetación inferior al 4-8 %) muestra una gran capacidad de disipación del calor, por lo que es necesaria para mitigar el efecto de isla de calor y proporcionar confort térmico en las zonas urbanas (dos Santos *et al.*, 2017; Wang, Liu, Tang, & Wang, 2019).

Para el análisis de la isla de Calor urbano, se usa una base de datos de temperaturas tomadas *in situ* (Lu, Feng, Xiao, Shen, & Sun, 2009). Sin embargo, esto es muy complejo porque los datos son tomados en puntos aislados, lo que genera una

distribución desigual y no representan completamente la distribución de la TST en toda el área de interés (Liu & Zhang, 2011).

Hoy en día, los satélites de monitoreo terrestre de alta resolución proporcionan datos básicos para el análisis de las ICU. La tecnología de teledetección en comparación con el método tradicional de observación meteorológica, tiene las ventajas de una alta resolución espacial, lo que permite investigar ICU a gran escala (Liu & Zhang, 2011). (Qin, Karnieli, & Berliner, 2001) propusieron un algoritmo de *mono-window* para obtener la TST utilizando datos de Landsat TM banda TIR (infrarrojo térmico), el cual consiste en un método simple y altamente efectivo para obtener la TST con la finalidad de analizar el efecto de isla de calor urbano (Lu *et al.*, 2009).

Debido a lo antes mencionado esta investigación tuvo como objetivo determinar la isla de calor urbano y su efecto del crecimiento no planificado del área urbana de la ciudad de Jaén en el período de 1995 a 2015.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General.

Determinar la isla de calor urbano y su efecto del crecimiento no planificado del área urbana de la ciudad de Jaén en el período de 1995 a 2015

2.2. Objetivos Específicos.

- Determinar la influencia de la disminución de áreas verdes en la aparición de islas de calor.
- Clasificar espacialmente la temperatura dentro del territorio de la ciudad de Jaén.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del área de estudio.

La presente investigación islas de calor urbano: efecto del crecimiento no planificado del área urbana de la ciudad de Jaén, se desarrolló en la ciudad de Jaén, distrito de Jaén, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, en las coordenadas geográficas, latitud -5.7072902 y longitud -78.8078537.

3.1.1. Localización y área de estudio.

a) Ubicación Geográfica.

Latitud : -5.70876
Longitud : -78.8077
Altitud : 730 msnm

b) Ubicación política.

Departamento : Cajamarca
Provincia : Jaén
Distrito : Jaén
Ubigeo : 06080



Figura 1. Mapa de Ubicación.

3.2. Materiales

3.2.1. Bases de datos

Para la identificación de áreas verdes en la ciudad de Jaén que tiene un área de 2440.434 hectáreas según el catastro urbano (Gerencia de catastro urbano - Municipalidad distrital de Jaén, provincia de Jaén, departamento Cajamarca – 2014), se realizó un mapeo con imágenes obtenidas directamente del Google Earth, se agregaron al *Software ArcGis 10.7* ® para su delimitación; posteriormente se realizó el cálculo de las áreas verdes de interés, es decir áreas verdes en las urbes que ayudan a dar un mejor confort térmico en la ciudad, algunos datos fueron obtenidos de base de datos de Instituciones Gubernamentales, Ministerio del Ambiente, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Ministerio de Agricultura y Riego, Municipalidad Provincial de Jaén y del SENAMHI.

Tabla 1. *Lista de archivos de polígonos.*

N°	Archivos Shapefile	año
1	Límite departamental	2014
2	Límite de provincias	2014
3	Límite de distritos	2014
4	Área efectivamente urbanizada	2014
5	Instituciones Educativas	2010
6	Centros de Salud	2010
7	Carreteras	2014
8	Parques	2014

Fuente: Adaptado a dos Santos *et al.*; 2017

Para el análisis de distribución espacial de islas de calor urbanas se utilizaron cuatro imágenes satelitales de Landsat TM 5 y una imagen Satelital Landsat TM 8 de los años (1995, 2000, 2005, 2011 y 2015), que fueron adquiridas en el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Según la ley N° 28294 la actualización catastral, se actualiza cada 5 años, por ende hemos considerado un periodo de estimación cada 5 años, considerando que en estos periodos se notara los cambios de uso del suelo de la ciudad de Jaén, ya que Jaén cuenta con registros de datos meteorológicos de la estación desde el año 1995.

Según Quin *et al.* (2001) para la estimación de TST mediante el algoritmo de *mono-window* que permite obtener una buen fotointerpretación, se utilizó la banda térmica de Landsat TM 5 (Banda 6). Para la estimación de TST de Landasat 8 se utilizó la banda 10 que es la banda térmica y solo se utilizó para el año 2015 porque el satélite landsat 8 fue puesto en órbita el 11 de febrero del 2013 (USGS, 2013)

Tabla 2. *Datos de imágenes satelitales Landsat TM5 y TM8.*

N°	Archivos	Día del año	Fecha	Hora
1	LT50090641995164CUB00	164	13/06/1995	14:27:58
2	LT50090642000242CUB02	242	29/08/2000	14:59:38
3	LT50090642005015CUB01	15	15/01/2005	15:07:49
4	LT50090642011224CUB00	224	12/08/2011	15:10:34
5	LC80090642015235LGN01	235	23/08/2015	15:21:29

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de selección de imágenes para la distribución de islas de calor urbano fue obtenido en horarios y meses diferentes, dependiendo del USGS y teniendo en cuenta que no estén con nubosidad (sin presencia de nubes en el área de estudio) para el buen procesamiento.

3.2.2. Equipos y software

- Una laptop
- Google Earth
- ArcGis 10.7 ®

- Microsoft Office 2013
- Lenguaje de programación R
- Estación meteorológica – Jaén – SENAMHI

3.3. Métodos

3.3.1. Mapeo de vegetación urbana de la ciudad de Jaén

De acuerdo a dos Santos et al, (2017) con la finalidad de determinar la distribución de vegetación urbana en la ciudad de Jaén y generar una especialización y mapeo de las mimas, se delimitaron y espaciaron cuatro polígonos de tipos de vegetación como se describe en la Tabla 3.

Se realizó una delimitación según las características de interés (áreas verdes en la ciudad que dan un confort térmico), utilizando imágenes del Google Earth, y posteriormente para su fotointerpretación se empleó el Software ArcGis 10.7 ®.

Los resultados de la delimitación y su fotointerpretación de vegetación, permitieron agrupar estos polígonos. Su área se calculó mediante la calculadora de mapas, obteniendo un mapa de vegetación urbana de la ciudad de Jaén.

3.3.2. Delimitación de áreas verdes urbanas.





Con la finalidad de determinar la distribución de vegetación urbana en la ciudad de Jaén y generar una especialización y mapeo de las mimas, se delimitaron y espaciaron cuatro polígonos de tipos de vegetación y sus límites como se describe en la Tabla 3.

Se realizó una delimitación según las características de interés (Parques, gramado, arborización privada y vegetación residencial), utilizándose imágenes del Google Earth y posteriormente para su fotointerpretación se empleó el *Software* ArcGis 10.7 ®.

Los resultados de la delimitación y su fotointerpretación de vegetación, permitieron agrupar estos polígonos. Su área se calculó mediante la

Calculadora de mapas, obteniéndose un mapa de vegetación urbana de la ciudad de Jaén en los periodos de 1995 - 2015.

Tabla 3. *Polígonos y representación de vegetación urbana de la ciudad de Jaén.*

Características	Descripción	Representación gráfica
Parques	Borde de las áreas del parque	
Gramado	Campos de fútbol	
Instituciones	Colegios, centros de salud	
Vegetación residencial	Vegetación en los patios traseros de las casas y alrededores de las manzanas.	

Fuente: Adaptado de dos Santos *et al*, (2017).

3.3.3. Índice de áreas verdes (IVA).

De acuerdo con dos Santos *et al*, (2017) para el desarrollo del IVA se basó en la identificación de áreas verdes urbanas de la ciudad, con ayuda de la vegetación de cobertura vegetal que han sido identificadas en la Tabla 2.

De acuerdo al flujograma de la figura 2, el Índice de Áreas Verdes (IVA), se calculó según la Ecuación (1):

$$IVA = \frac{AV}{NH} \dots\dots\dots Ecu. (1)$$

Donde:

IVA: Índice de áreas verdes (m²/habitante).

NH: Número de habitantes

AV: Áreas Verdes

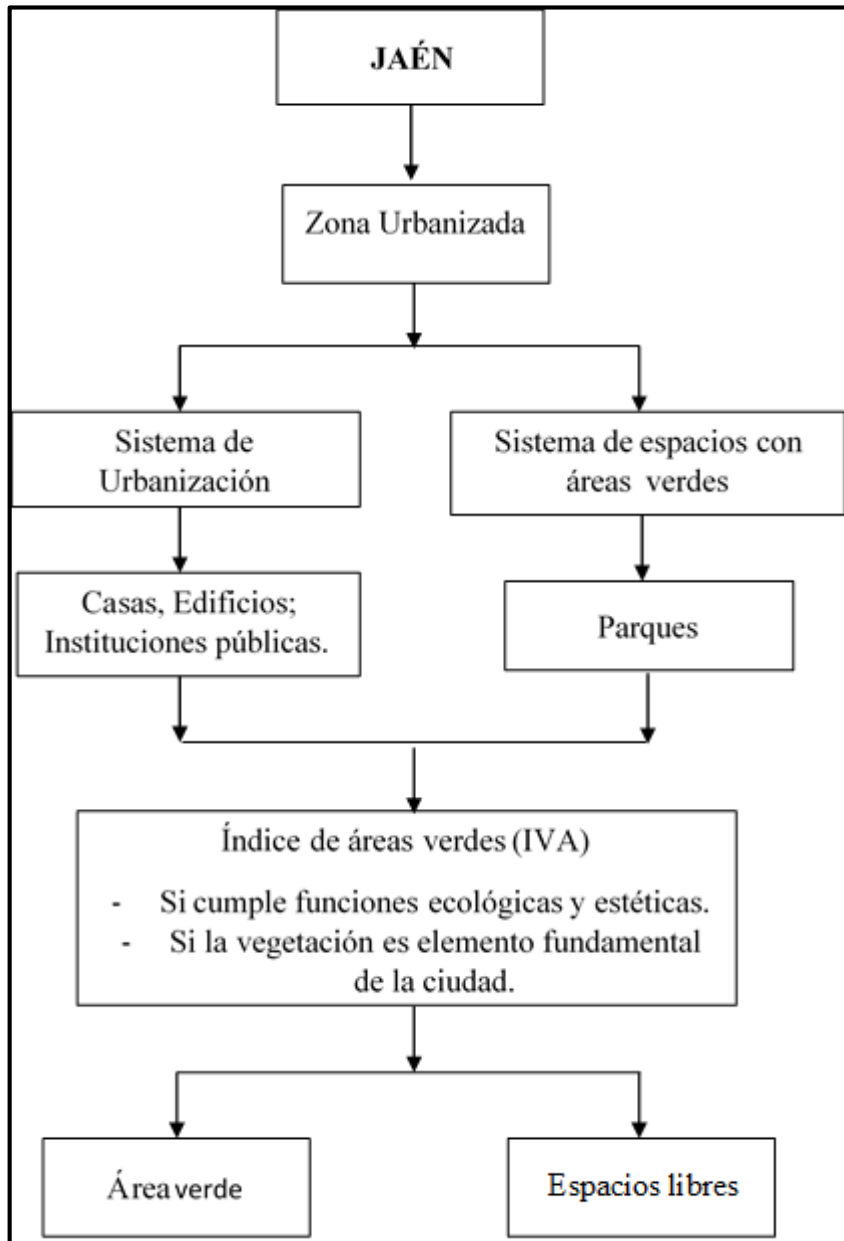


Figura 2. Esquema representativo de urbanización.

3.3.4. Obtención de temperatura de la superficie terrestre.

Este paso buscó establecer una relación entre la distribución espacial de temperatura de la superficie de la tierra (TST) y las áreas verdes, como ha sido influenciado por la urbanización de la ciudad de Jaén. Para la presente investigación se utilizó la metodología según (dos Santos, *et al*; 2017).

Para el desarrollo de la temperatura de la superficie de la tierra (TST), se utilizaron los datos de la estación meteorológica “Jaén” que está ubicada en las siguientes coordenadas latitud -5.403599, longitud 78.462705 del SENAMHI.

Tabla 4. *Datos de Variables Meteorológicas - SENAMHI*

	Datos	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
01	13/06/1995	22.5	68.40
02	29/08/2000	23.8	75.00
03	15/01/2005	28.7	77.00
04	12/08/2011	27.5	70.00
05	23/08/2015	27.0	67.00

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Ubicación de estación meteorológica Jaén.

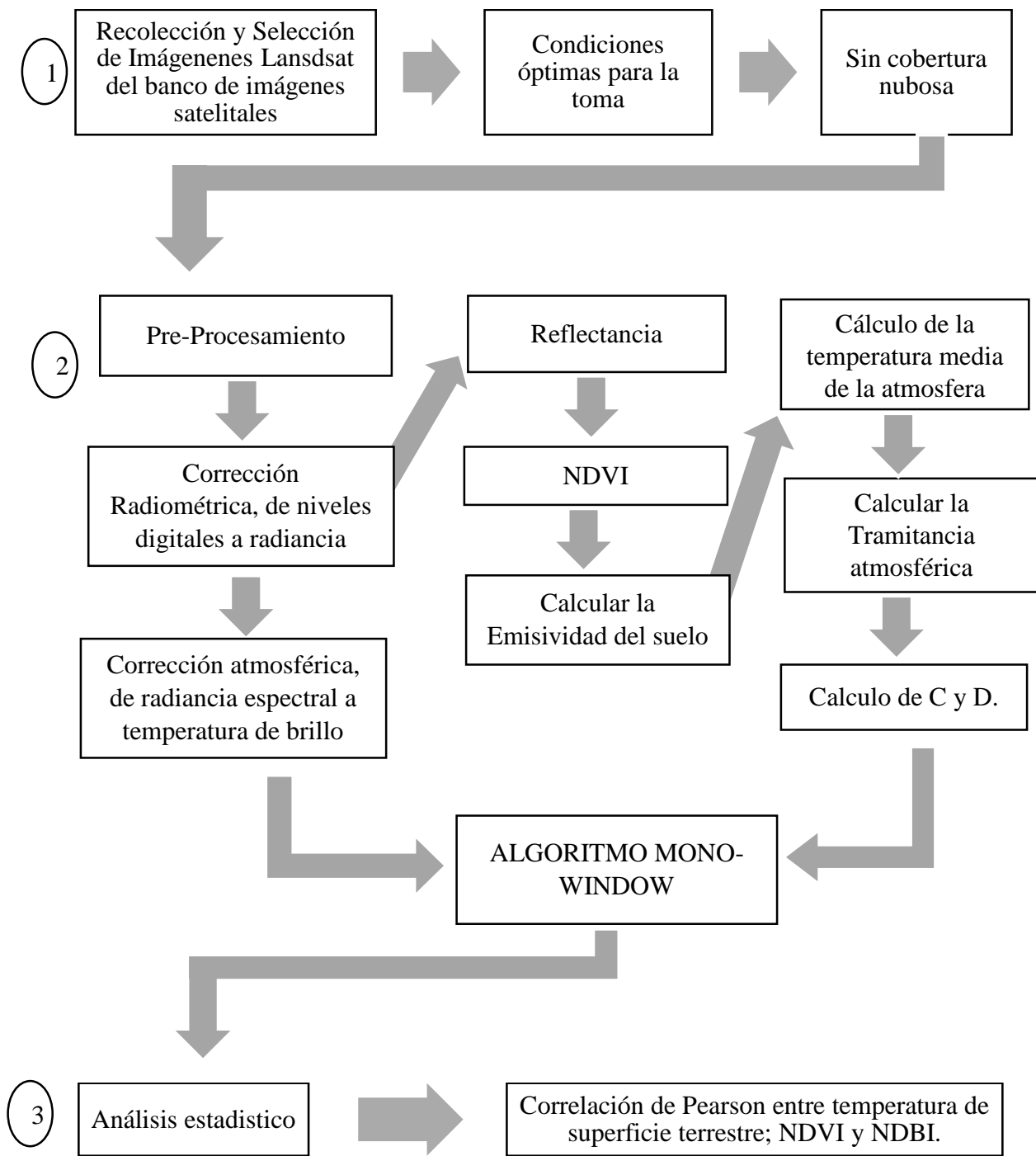


Figura 4. Esquema de metodología de estudio.

El procedimiento descrito en el esquema fue seguido para la obtención de los datos, siguiendo la metodología de dos Santos *et al.*, (2017), que se detalla a continuación.

3.3.4.1. Pre procesamiento Landsat TM5.

El pre-procesamiento fue realizado en el software ArcGIS® 10.7. El procedimiento fotointerpretación, se hizo mediante el escaneo y/o visualización de la pantalla en la escala cartográfica y fue corroborada a través de imágenes del servidor Google Earth.

Para el cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se utilizó la banda del infrarrojo cercano y la banda visible del rojo de LANDSAT y se emplearon los valores de referencia de modificación de la cobertura vegetal (dos Santos *et al.*, 2017).

En el estudio se empleó la técnica de *Mono-window* (Qin *et al.*, 2001).

Para determinar las islas de calor de superficie urbana se utilizó tecnología de Teledetección de imágenes satelitales con la banda térmica del LANDSAT. Se aplicó el uso de algoritmos que convierten el nivel digital en radiancias, para luego hallar los valores de temperatura de brillo, siendo corregidos por la emisividad. Después de hallar los valores de temperatura por cada pixel de las imágenes satelitales, se procedió a realizar una interpolación, permitiendo obtener la configuración de las ICU, siguiendo la metodología utilizada por dos Santos, *et al.*; (2017). A continuación, se detalla el proceso.

Paso 1: Conversión de los números digitales (DN) a radiancia espectral (Li).

Para convertir los valores de DN (Landsat-5 TM) en radiancia espectral, se empleó la ecuación (2) que se describe según lo propuesto ,(Chander, Markham, & Helder, 2009).

$$L_i = L_{min} + (L_{max} - L_{min})Q_{dn}/Q_{max} \dots\dots\dots Ecu. (2)$$

Donde:

- L_i : Radiancia espectral recibida por el sensor ($W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$).
- L_{max} : Radiancia espectral máxima del sensor ($W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$).
- L_{min} : Radiancia espectral mínima del sensor ($W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$).
- Q_{max} : Valor de píxel máximo (número digital).
- Q_{nd} : Valor de DN del píxel (número digital).

Paso 2: Conversión de la radiancia espectral (L_i) a reflectancia (ρ).

Se convirtió la radiancia de las bandas 3 y 4 del sensor TM a reflectancia según la ecuación (3) para obtener el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Markham & Barker, 1985).

$$\rho = \frac{\pi \times L_i \times d^2}{E_{sol\lambda} \times \cos \theta_s} \dots\dots\dots \text{Ecu. (3)}$$

Donde:

- ρ : reflectancia media a nivel satelital (adimensional)
- π : constante matemática igual a 3,14159 aproximadamente (adimensional).
- L_i : radiancia espectral del sensor ($W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$).
- d : distancia tierra-sol (unidades astronómicas),
- $E_{sol\lambda}$: irradiancia solar exo-atmosférica promedio ($W.m^{-2}sr^{-1}.\mu m^{-1}$).
- $\cos\theta_s$: ángulo cenital solar (grados).

Paso 3: Conversión de la radiancia espectral (L_i) a temperatura de brillo del sensor (T_{sensor})

En este paso, la temperatura de brillo del sensor a nivel satelital se estimó utilizando la ecuación (4) (Schott & Volchok, 1985), en el cual los parámetros K_1 y K_2 fueron los propuestos por (Schneider & Mauser, 1996).

$$T_{Sensor} = \frac{\kappa_2}{\ln(1 + \frac{\kappa_1}{L_1})} \dots\dots\dots Ecu. (4)$$

Donde:

- T_{sensor} : Temperatura de brillo del sensor (K)
- K_1 : Constante de calibración (607.76 W.m⁻²sr⁻¹.μm⁻¹).
- K_2 : Constante de calibración (1260.56 K)
- L_i : Radiancia espectral recibida por el sensor (W.m⁻²sr⁻¹.μm⁻¹).

Paso 4: Emisividad estimada (ϵ)

Para estimar la emisividad se utilizó el método de Van De Griend & Owe, (1993) en el que a cada tipo del uso del suelo se le asignó un valor de emisividad basado en el intervalo de NDVI (Ecuación 5), cómo se muestra en la Tabla 4.

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \dots\dots\dots Ecu. (5)$$

Donde:

- NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada,
- ρ_4 es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y
- ρ_3 es la reflectancia en la banda del rojo.

Para el rango de valores NDVI, Van De Griend & Owe (2003) desarrollaron una ecuación efectiva para obtener la emisividad de la superficie.

$$\epsilon = 1.0094 + 0.0047 \times \ln(NDVI) \dots\dots\dots Ecu. (6)$$

Donde:

- ε : Emisividad de la superficie terrestre (adimensional)
- NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada (adimensional).

Tabla 5. Estimación de la Emisividad utilizando el valor del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

NDVI	EMISIVIDAD
NDVI < - 0.185	0.995
-0.185 ≤ NDVI < 0.157	0.970
0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727	1.0094 + 0.47 ln(NDVI)
NDV > 0.727	0.990

Fuente: Van De Griend & Owe, (1993).

Paso 5: Estimación de la transmitancia atmosférica (τ)

Antes de obtener la transmitancia atmosférica, se estimará el vapor de agua atmosférico usando la ecuación (7) (Li 2006; Yang y Qiu, 1996).

$$w = 0.0981 * \left\{ 10 * 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * (T_0 - 273.15)}{237.3 + (T_0 - 273 - 15)} \right] * HR \right\} + \dots \text{Ecu. (7)}$$

0.1697

Donde:

- w : Contenido de vapor de agua de la atmósfera (gcm^{-2})
- T_0 : Temperatura del aire cerca de la superficie (K)
- HR: es la humedad relativa (%).

Posteriormente a la obtención del contenido de vapor de agua de la atmósfera, la transmitancia atmosférica se calculó con la ecuación (8) teniendo en cuenta el perfil local y el vapor de agua en el mismo, según lo propuesto por Qin, Karnieli, & Berliner, (2001) y que se muestra en la Tabla 6.

$$t = 1.031412 - 0.11536 \times w \quad \dots\dots\dots \text{Ecu. (8)}$$

Donde:

- t: Transmitancia atmosférica
- w: Vapor de Agua (g/cm²)

Tabla 6. *Estimación de la transmitancia atmosférica*

Perfiles	Vapor De Agua (W)(g/cm ²)	Ecuación de estimación de Transmitancia.	Correlación R ²	Error Estándar
Alta temperatura del aire	0.4 – 1.6	$\tau_6 = 0.97429 - 0.08007w$	0.99611	0.002368
	1.6 – 3.0	$\tau_6 = 1.031412 - 0.11536w$	0.99827	0.002539
Baja temperatura del aire	0.4-1.6	$\tau_6 = 0.982007 - 0.09611w$	0.99563	0.003340
	1.6 – 3.0	$\tau_6 = 1.053710 - 0.14142w$	0.99899	0.002375

Fuente: Qin *et al.* (2001).

Los datos de temperatura del aire (T₀ y humedad relativa (HR) se obtuvieron de la estación meteorológica Jaén, disponibles en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Paso 6: Estimación de la temperatura atmosférica promedio (Ta)

La ecuación (9) para estimar la temperatura atmosférica promedio fueron las propuestas por Qin *et al.* (2001).

$$T_a = 17.9769 + 0.91715 \times T_0 \quad \dots\dots\dots \text{Ecu. (9)}$$

Donde:

- Ta: Temperatura atmosférica promedio
- T₀: Transmitancia atmosférica

Tabla 7. Estimación de la temperatura atmosférica media efectiva.

Área	Ecuación de temperatura atmosférica (Ta) (k)
Para USA 1976	$T_a = 25.9396 + 0.88045 \times T_0$
Para Tropical	$T_a = 17.9769 + 0.91715 \times T_0$
Para latitudes medias en verano	$T_a = 16.0110 + 0.92621 \times T_0$
Para latitudes medias en invierno	$T_a = 19.2704 + 0.91118 \times T_0$

Fuente: Qin *et al.* (2001).

Paso 7: Distribución espacial de la temperatura de la superficie de la Tierra.

Después de realizar todos los pasos descritos anteriormente y adquirir todas las variables necesarias, se aplicó el algoritmo *mono-window* (Qin *et al.*, 2001) utilizando la ecuación (12), obteniendo así la distribución espacial de la TST para las imágenes del Landsat para la ciudad de Jaén. Las ecuaciones (10 y 11) son constantes, que sirven para simplificar la ecuación (12).

$$C = \varepsilon x t \dots\dots\dots\text{Ecu. (10)}$$

$$D = (1 - t) x [1 + (1 - \varepsilon)x t] \dots\dots\dots\text{Ecu. (11)}$$

$$TST = \frac{\{a x (1 - C - D) + [bx(1 - C - D) + C + D]xT_{sensor} - DxT_a\}}{C} \dots\text{Ecu. (12)}$$

Donde:

- a: -67.355351
- b: 0.458606
- ε: Emisividad de superficie terrestre (adimensional)
- t: Transmitancia atmosférica (adimensional)
- Ta: Temperatura media atmosférica (K)

3.3.4.2. Preprocesamiento Landsat TM 8.

Paso 1: Conversión de los números digitales (DN) a radiancia espectral (L_i). Para convertir los valores de DN en radiancia espectral, usaremos la ecuación (13) propuesto por Chander *et al.*, (2009) .

$$L_i = M_L x Q_{cal} + A_L \quad \dots\dots\dots \text{Ecu. (13)}$$

Donde:

- L_i : Radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$).
- M_i : Es el factor multiplicativo de escalado especifico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- A_L : Es el factor aditivo de escalado especifico obtenido del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)
- Q_{cal} : Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Paso 2: conversión a reflectancia TOA con corrección angular.
El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera; así como, del ángulo de observación (Chander *et al.*, 2009).

De esta manera, la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA con una corrección para el ángulo solar se calculó por la siguiente ecuación (14):

$$\rho_\lambda = \frac{(M_\rho x Q_{cal} + A_\rho)}{\sin(\theta_{se})} \quad \dots\dots\dots \text{Ecu. (14)}$$

Donde:

- ρ_λ : Reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

- M_p : Factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- A_p : Factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- θ_{se} : ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).
- Q_{cal} : Producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Paso 3: Conversión de la radiancia espectral (L_i) a temperatura de brillo del sensor (T_{sensor})

En este paso, para estimar la temperatura de brillo del sensor a nivel satelital se utilizó la ecuación (15) (Schott & Volchok, 1985) en el cual

$$T_{Sensor} = \frac{\kappa_2}{\ln\left(1 + \frac{\kappa_1}{L_1}\right)} \dots\dots\dots \text{Ecu. (15)}$$

los parámetros K_1 y K_2 fueron los propuestos por Schneider y Mauser (1996).

Donde:

- T_{sensor} : Temperatura de brillo del sensor (K).
- K_1 : Constante de calibración Banda 10 (774.8853 $mW m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)
- K_2 : Constante de calibración Banda 10 (1321.0789K)
- L_1 : Radiancia espectral recibida por el sensor ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$).

Paso 4: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para el cálculo de NDVI se utilizó la ecuación (16) utilizando el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio.

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \dots\dots\dots Ecu. (16)$$

Donde:

- NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada,
- ρ_5 es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano
- ρ_4 es la reflectancia en la banda del rojo.

Paso 5: estimación de proporción de vegetación.

Para la estimación de la proporción de vegetación se consideraron los valores máximo y mínimo del NDVI utilizando la ecuación (17) (Sobrino *et al.*, 2004).

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \dots\dots\dots Ecu. (17)$$

Donde:

- P_v = Proporción de vegetación.
- NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada
- $NDVI_{min}$: índice de vegetación de diferencia normalizada mínimo
- $NDVI_{max}$: índice de vegetación de diferencia normalizada máximo.

Paso 6: Emisividad estimada.

Con respecto a la naturaleza del tipo de cobertura del suelo. La emisividad de una superficie heterogénea se calculó utilizando la ecuación (18) (Sobrino *et al.*, 2004).

$$\varepsilon = 0.004xP_v + 0.986 \dots\dots\dots Ecu. (18)$$

Tabla 8. *Estimación de la Emisividad utilizando el valor del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).*

NDVI < 0.2	0.979 - 0.046ρ
0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5	0.979 (1-Pv)+0.987(Pv)
NDVI > 0.5	0.99

Fuente: Skoković *et al.*, (2014).

Paso 7: Cálculo de la temperatura superficial de la tierra.

Finalmente, se calculó la temperatura de la superficie terrestre según ecuación (19) (Artis & Carnahan, 1982)

$$TST = (T_{sensor} / (1 + (0.00115 \times \frac{T_{sensor}}{1.43388}))) \times \ln \epsilon \quad \dots\dots \text{Ecu. (19)}$$

Donde:

- TST: Temperatura superficial de la Tierra (K)
- T_{sensor}: Temperatura de brillo del sensor (K)
- ε: Emisividad.

3.3.4.3. Procesamiento imágenes Landsat TM.

Para analizar las islas de calor urbano se utilizó la fotointerpretación, se elaboró un mapa representativo clasificado en cinco clases de temperaturas. Se consideró como islas de calor urbanas a aquellas superficies que tienen una temperatura mayor al promedio de la temperatura encontrada en el área urbanizada.

Tabla 9. *Clasificación de la temperatura superficial de la tierra.*

N°	Clase °C
1	Menor a 25
2	25 -28
3	28-31
4	31-34
5	Mayor a 34

Fuente: Adaptación a dos Santos *et al.* 2017.

3.3.4.4. Determinación del índice de acumulación de diferencia normalizada (NDBI).

El índice de diferencia normalizada edificada propuesto por Zha *et al.* (2003) (Ecuación. 20) se usará para identificar las áreas urbanas y construidas.

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \dots\dots\dots \text{Ecu. (20)}$$

Donde:

- NDBI: Índice de diferencia normalizada edificada (adimensional),
- MIR: Infrarrojo medio (adimensional)
- NIR: Infrarrojo cercano (adimensional).

3.3.4.5. Valoración ecológica de la ciudad.

El índice de variación de campo térmico urbano (UTFVI) se utilizó para evaluar el efecto de las ICU considerando los aspectos ecológicos de la ciudad según la metodología propuesta por dos Santos *et al.*, (2017); Zha, Gao, & Ni, (2003). El UTFVI se calculó mediante la ecuación (21) que se muestra a continuación:

$$UTFVI = \frac{TST - T_{mean}}{TST} \dots\dots\dots \text{Ecu. (21)}$$

Donde:

- UTFVI es el índice de variación del campo térmico urbano (adimensional),
- TST: Temperatura de la superficie terrestre en (K),
- Tmean: TST media (K).

Los valores límite para el índice de evaluación ecológica relacionado con UTFVI se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores límite del índice de evaluación ecológica.

Índice de variación del campo térmico urbano	Fenómeno de la isla de calor urbano	Índice de evaluación ecológica
< 0.01	Débil	Bueno
>0.01	Fuerte	Malo

Fuente: dos Santos *et al*, (2017); Liu & Zhang, (2011).

3.3.4.6. Análisis estadístico.

a. Análisis estadístico.

Para comparar la influencia de las áreas verdes y las áreas construidas sobre el efecto de ICU, se calculará el coeficiente de correlación de Pearson entre NDVI, TST y NDBI utilizando la ecuación (22).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots \text{Ecu. (22)}$$

Dónde: **r** es el coeficiente de correlación de Pearson, x_i valores medidos de la variable x, y y_i valores medidos de la variable y.

IV. RESULTADOS.

4.1. Delimitación de la vegetación urbana de la ciudad Jaén.

La delimitación de las áreas urbanas, fueron identificadas según los polígonos descritos en la Tabla 1, obteniéndose el mapa de vegetación urbana de la ciudad de Jaén (Figura5).

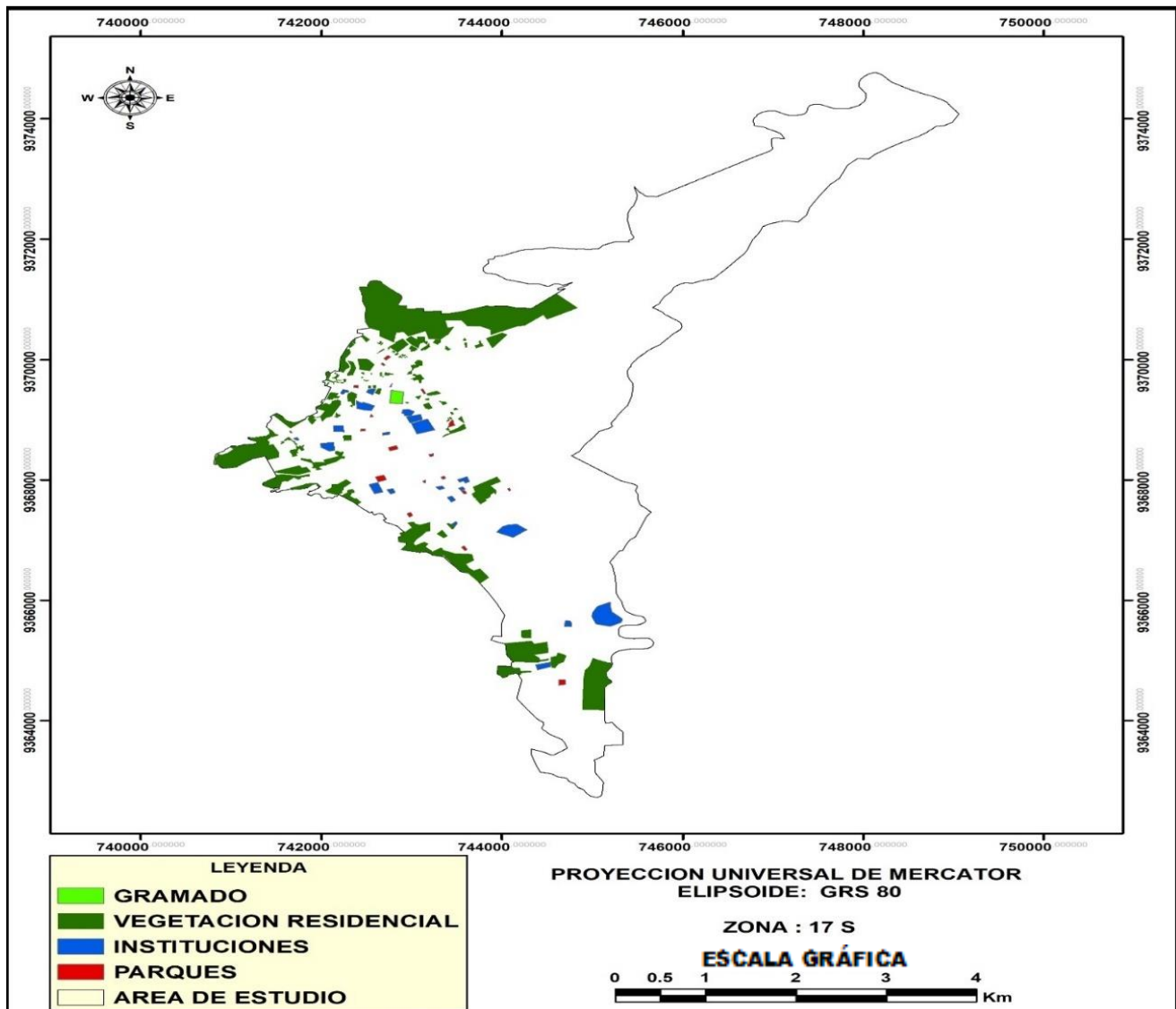


Figura 5. Mapa de la vegetación urbana de la ciudad de Jaén

La cuantificación en hectáreas (Ha) y el porcentaje de cada clase de vegetación urbana, en relación con el área mapeada y el área de estudio, se puede observar en el Tabla 11.

Tabla 11. *Cuantificación y el porcentaje (%) de clases de vegetación en la ciudad de Jaén.*

Clases de vegetación	Área (ha)	Relación con el área urbanizada (%)	Área de relación delimitada (%)	Área delimitada (%)
Parques	4.936	0.64	1.70	0.20
Gramado	2.919	0.33	1.00	0.12
Instituciones	31.568	3.60	10.80	1.92
Vegetación residencial	252.443	28.80	86.50	10.31
Total, del área delimitada	291.866			11.96
Total del área urbanizada	875.858			

Fuente elaboración propia.

Se identificaron y delimitaron 291.866 hectáreas de áreas verdes urbanas, distribuidos en cinco clases en la ciudad de Jaén, representando el 11.96 % del área de estudio.

Se destaca en relación una mayor incidencia de las áreas asignadas de la clase vegetación residencial y áreas libres, con 252.443 ha, que representan el 86.493 % del total del área delimitada.

Los parques que son áreas de gran impacto en la planificación urbana solo representan el 0.20 % del área delimitada, y el gramado que se concentra mayormente en el estadio y campos fútbol representa un 0.12 % del área delimitada (11.96%).

Si bien hay un buen número de áreas verdes, la mayoría está representada por áreas libres que aún no han sido construidas, pero en su mayoría están destinadas para este fin.

4.2. Índice de áreas verdes (IAV).

El Índice de Área Verdes (IAV) que es la relación entre las áreas verdes y el número de habitantes de la ciudad, a menudo se utiliza como indicador de calidad ambiental, para la ciudad de Jaén fue 27.482 m² / hab. (dos Santos *et al*, 2017).

4.3. Distribución de isla de calor urbana en la ciudad de Jaén.

En la Tabla 12 se resumen los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones para la estimación de la temperatura de la superficie de la tierra. Valores expresados en grados Celsius para la temperatura máxima, mínima y promedio.

Tabla 12. Temperaturas estimadas para la ciudad de Jaén en °C.

Fecha de información	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura promedio
1995	37.974	21.351	29.663
2000	38.217	22.730	30.473
2005	40.310	23.156	31.733
2011	40.923	22.310	31.616
2015	40.299	26.716	33.507

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran el incremento de la temperatura superficial de la tierra en la ciudad de Jaén desde 1995 a 2015, incremento significativo de 3.844 °C en su temperatura promedio. La Figura 6 presenta el resultado de la distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre, la característica principal de la isla de calor urbana, para 5 imágenes en diferentes fechas y períodos de 1995 a 2015.

La Figura 6 presenta el resultado de la distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre, la característica principal de la isla de calor urbana, para 5 imágenes en diferentes fechas y períodos de 1995 a 2015.

En la figura 6 se muestra la existencia del efecto de la isla de calor urbana en la ciudad de Jaén. En las diferentes imágenes evaluadas se observa el crecimiento y expansión de las ICU desde el año 1995 a 2015 ha sido muy significativo, esto se debe al crecimiento de la ciudad y la eliminación de vegetación de esta.

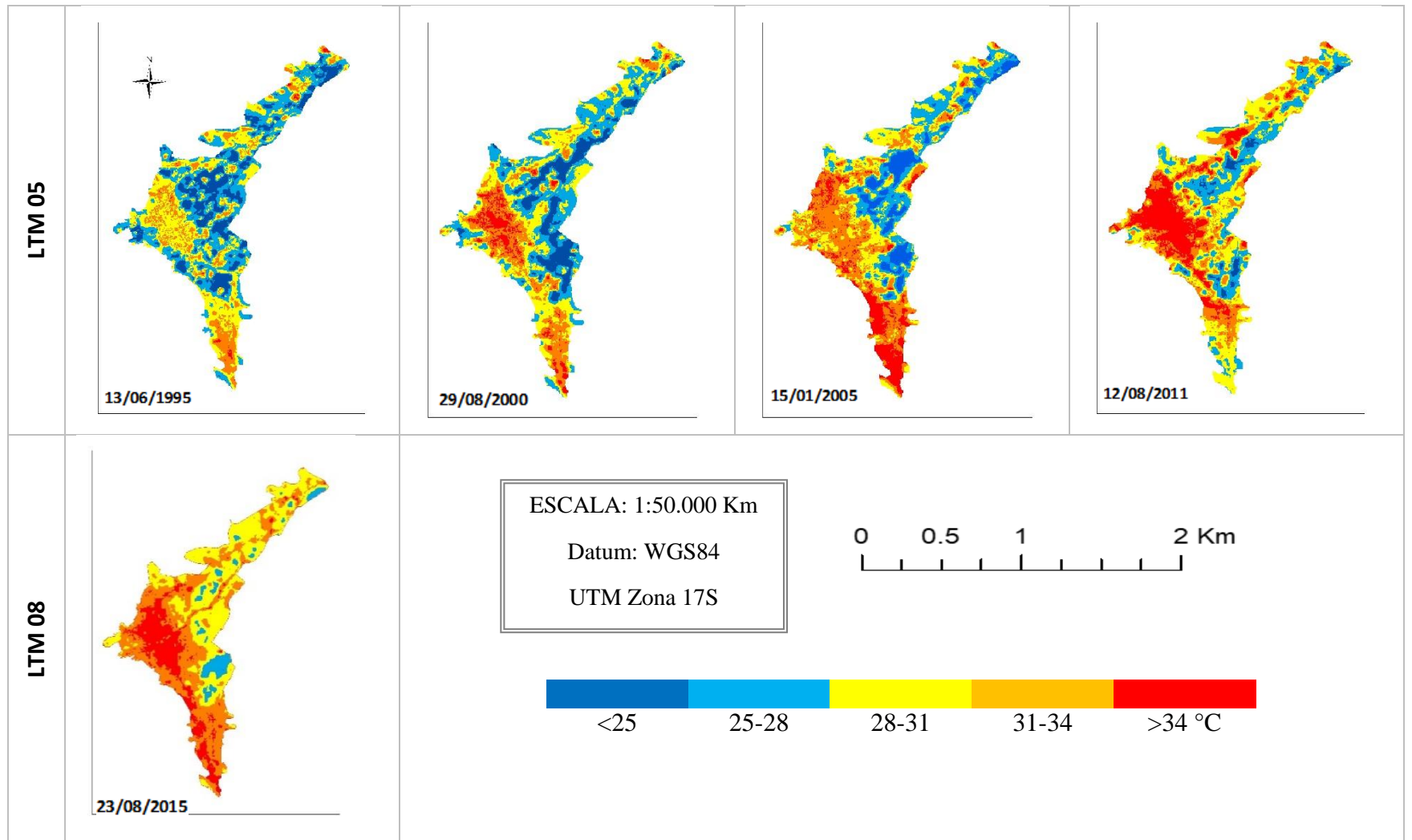


Figura 6. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 1995 y 2015.

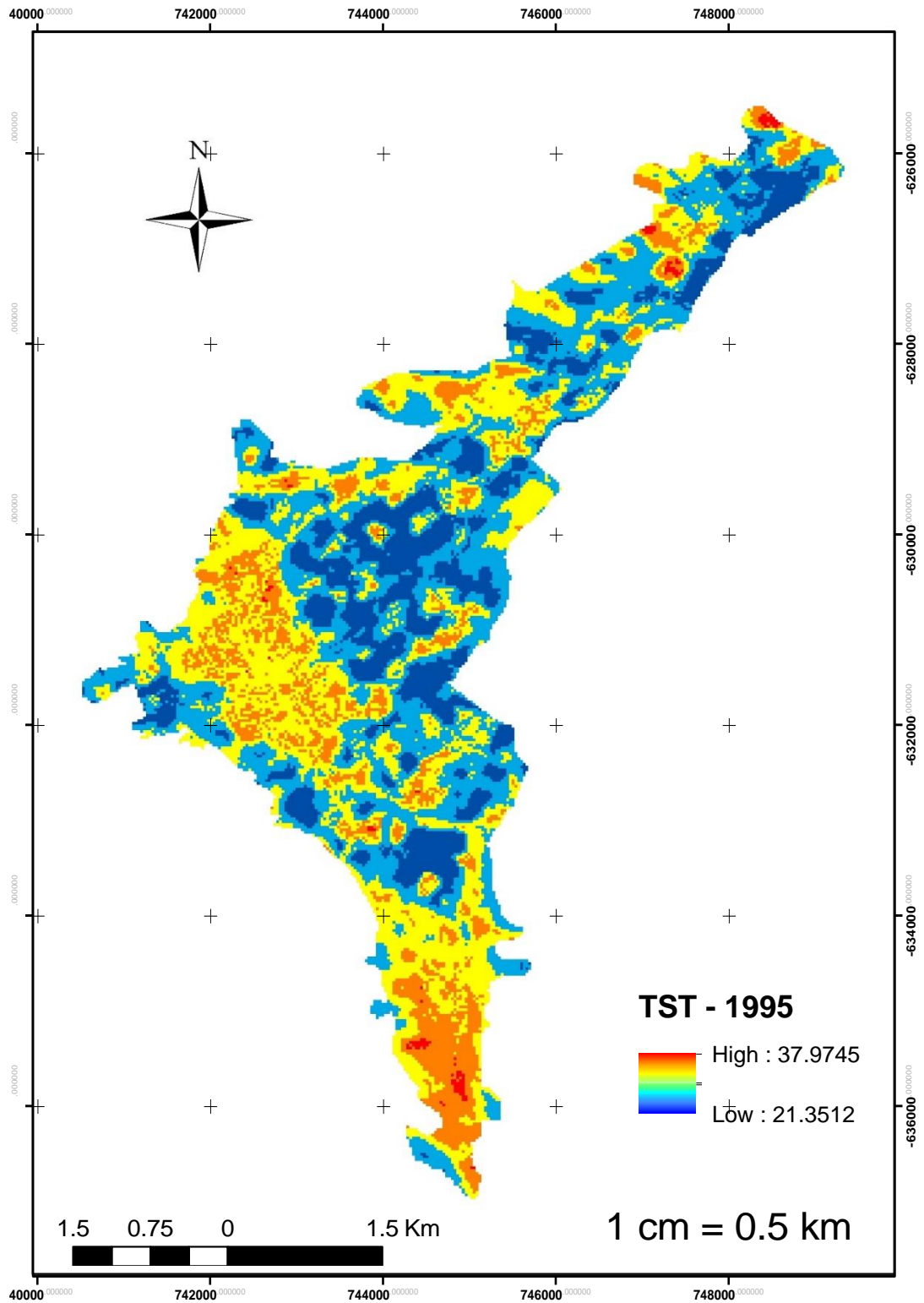


Figura 7. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 1995

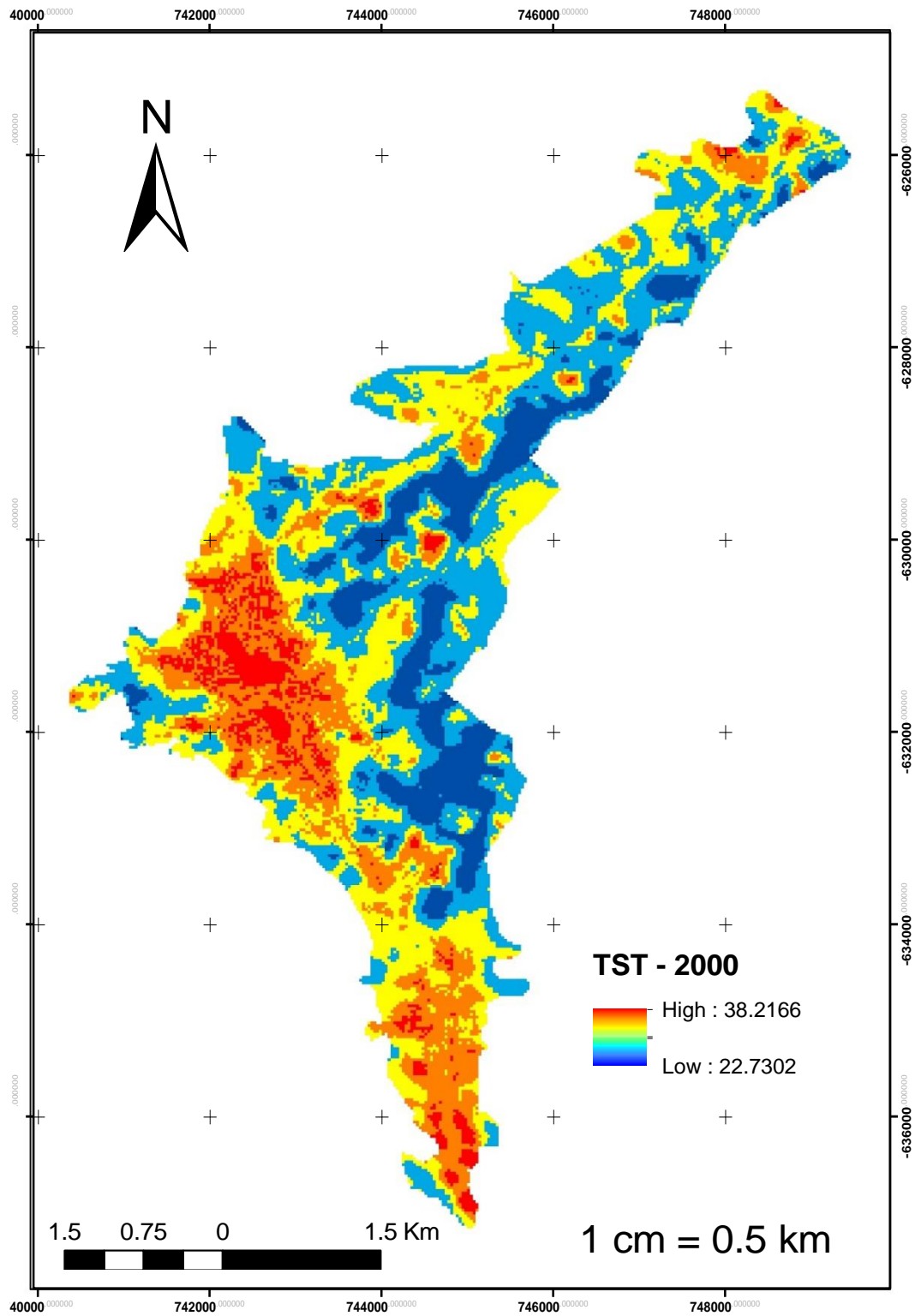


Figura 8. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2000

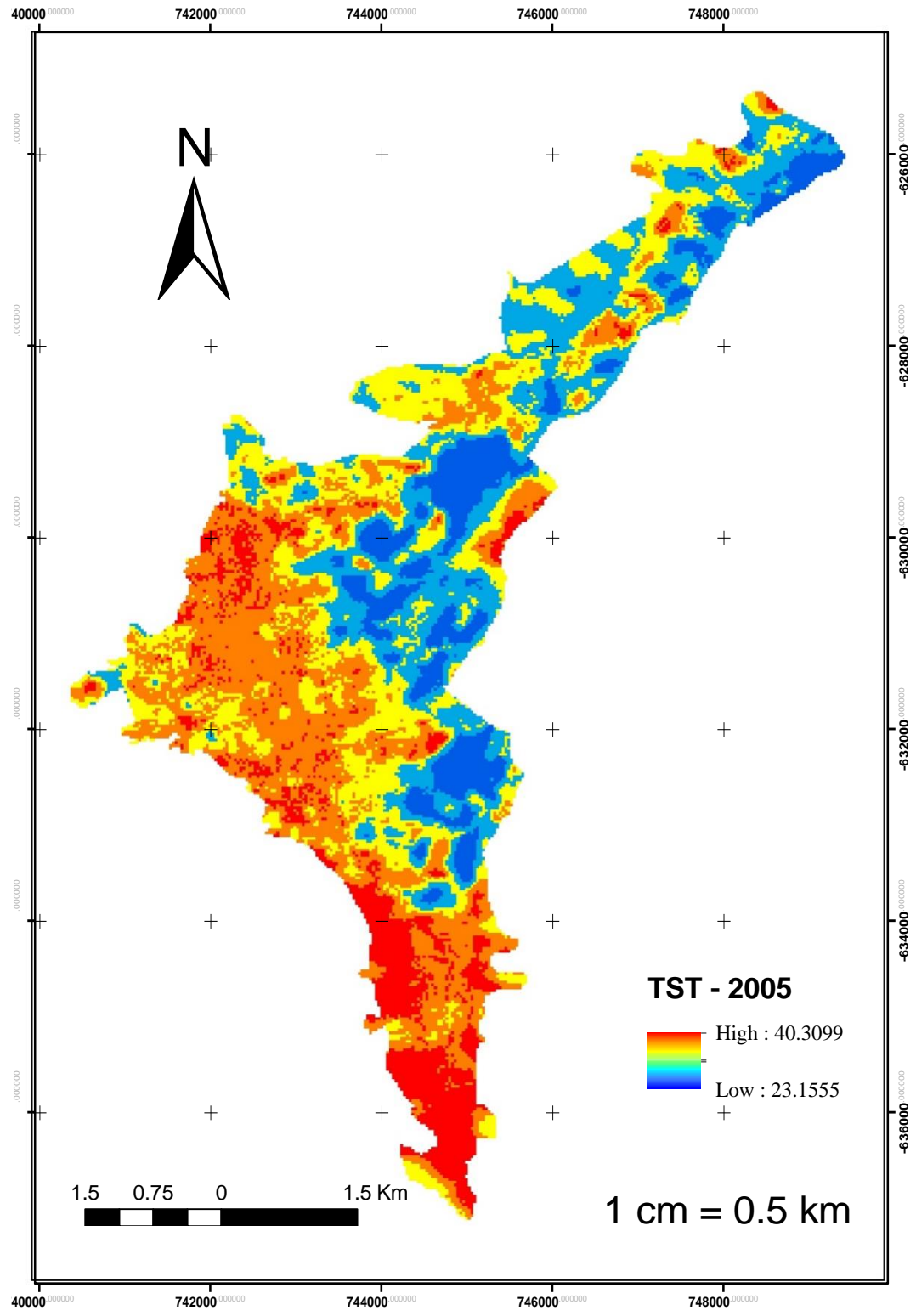


Figura 9. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2005

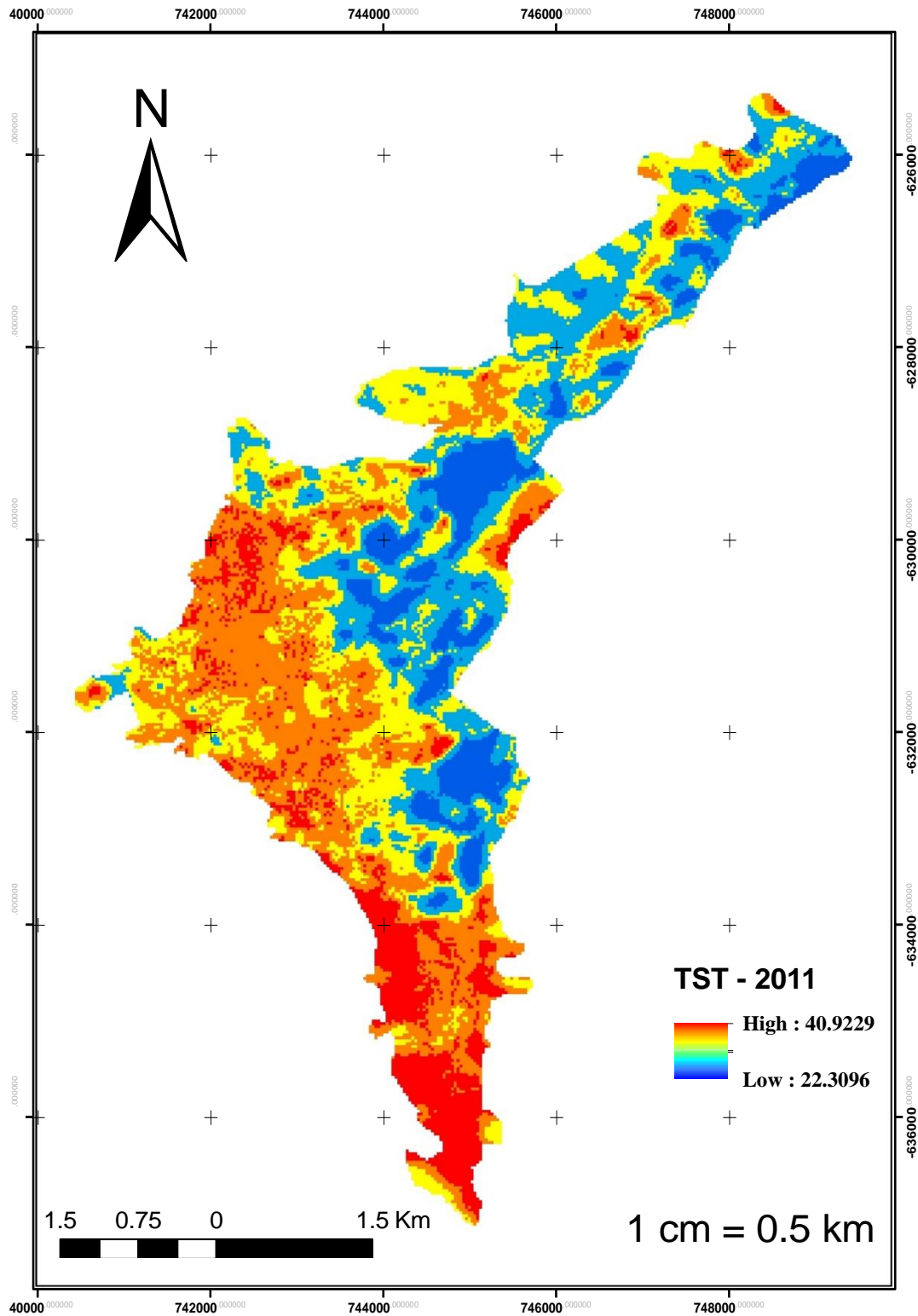


Figura 10. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2011

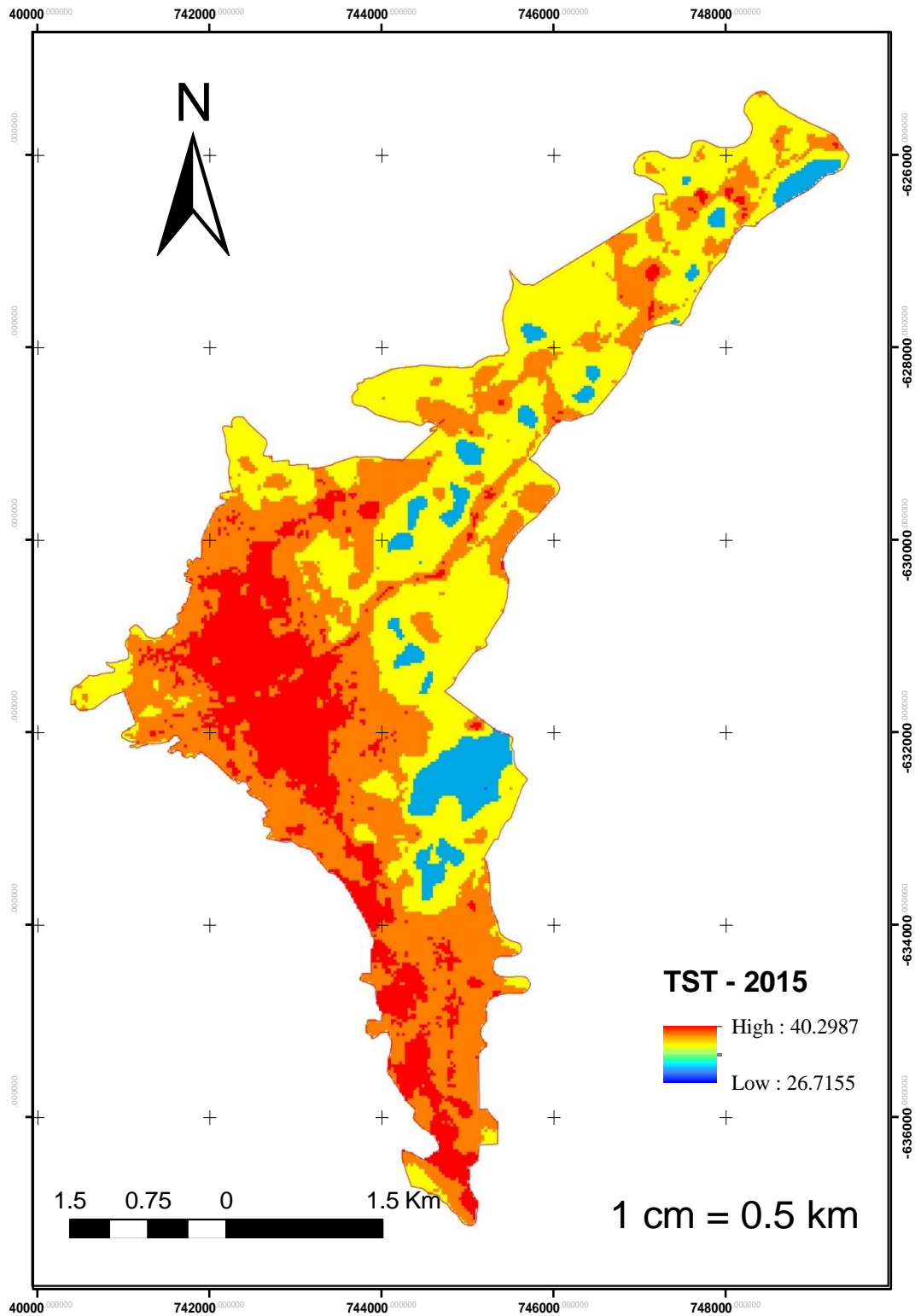


Figura 11. Distribución de la temperatura de la superficie terrestre para la ciudad de Jaén entre 2015.

El comportamiento del efecto de isla de calor urbano entre los años 1995 a 2015 en la ciudad de Jaén se puede explicar mejor los resultados según la Figura 7.

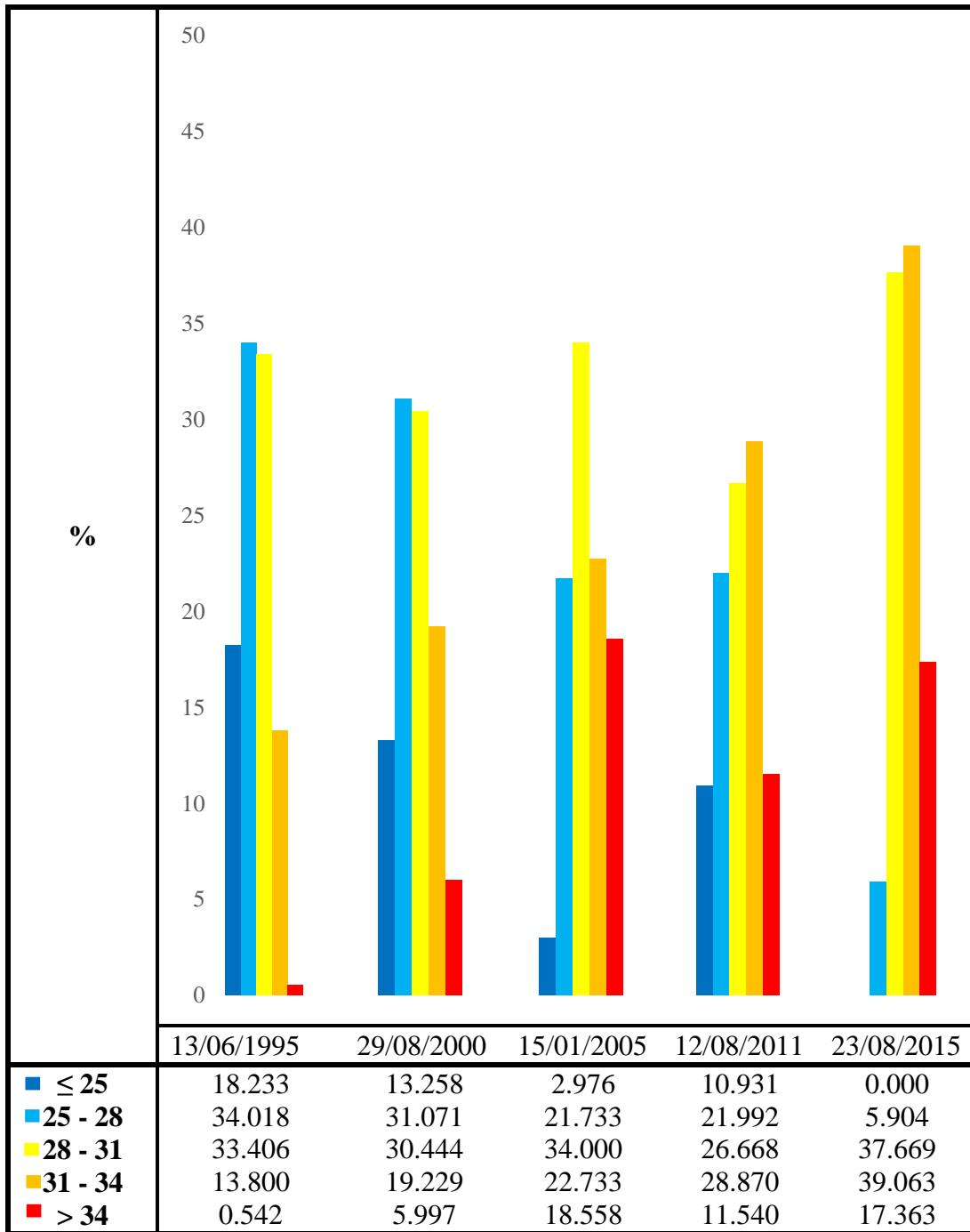


Figura 12. Proporción de la distribución de las clases de temperatura de la superficie de la tierra entre los años 1995-2015, para ciudad de Jaén.

Para el año 1995 la temperatura superficial de la tierra osciló principalmente entre los 24 °C y 28 °C con un 34.18%, pero la zona urbana para este año la temperatura superficial de la tierra está representada principalmente entre 28 y 31 °C con un 33.406 % esto se debe que para este año la presencia de área verde era mayor a la urbanizada, para el año 2000 las temperaturas que predominan son las que oscilan entre 25 °C y 28 °C con 31.071 %,

Para el año 2005 las temperaturas predominantes están entre 28 °C a 31°C con 34 % en este año se tiene un aumento muy significativo de las temperaturas superiores a 34 °C para los años 2011 y 2015 las temperaturas predominantes que abarcan mayor área oscilan en 31 °C 34°C, con 28.870 % y 39.063% respectivamente.

En los dos últimos periodos se observó la máxima de la temperatura superficial de la tierra superó los 40°C en comparación con las demás imágenes evaluadas. La temperatura en los periodos evaluados fue mostrando una tendencia mayor sobre todo en la temperatura máxima, el año 2015 en comparación a 1995 tiene una diferencia de más de 3 °C.

Los resultados muestran un incremento de temperatura media de la superficie de la tierra de los años 1995 a 2015 donde hubo un incremento de más de 3 °C en su temperatura promedio, este aumento está relacionado con el cambio de uso del suelo, donde las áreas verdes han sido reemplazados por urbanización esto contribuye a la aparición de ICU.

4.4. Evaluación ecológica de las islas de calor.

A partir del valor obtenido en el cálculo UTFVI, fue posible realizar la evaluación ecológica de la isla de calor urbano de la ciudad de Jaén, entre 1995 y 2015 con base en los parámetros desarrollados por Zhang (2006) y adaptado por dos Santos *et al*, (2017), ilustrados en la Figura 8.

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 8, se observa que, en todas las fechas de imágenes clasificadas de la ciudad de Jaén, las áreas urbanizadas de la ciudad fueron clasificadas ecológicamente como bueno y malo (áreas sin vegetación), como se muestra en la Tabla 10 (Liu & Zhang, 2011).

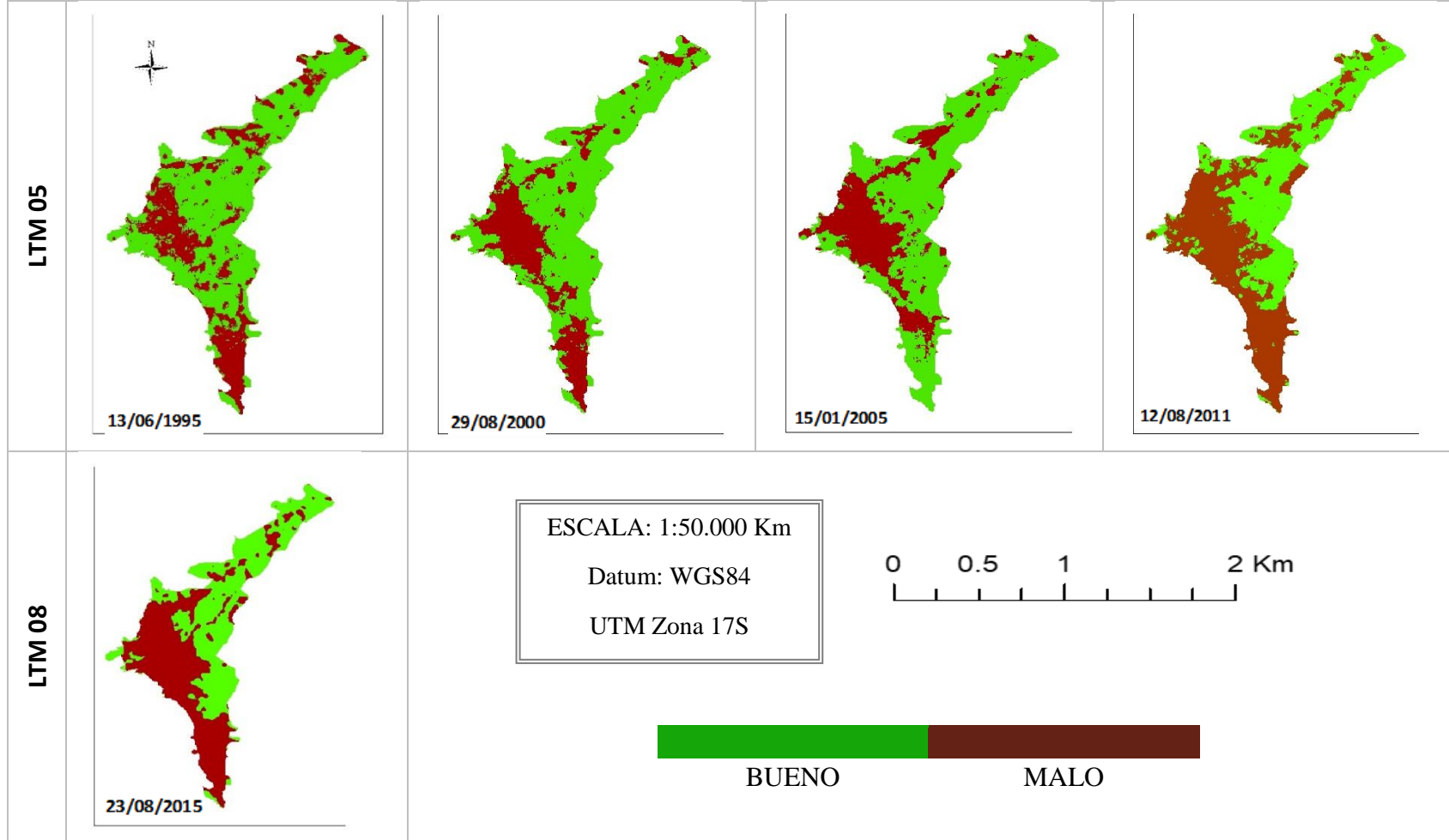


Figura 13. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén.

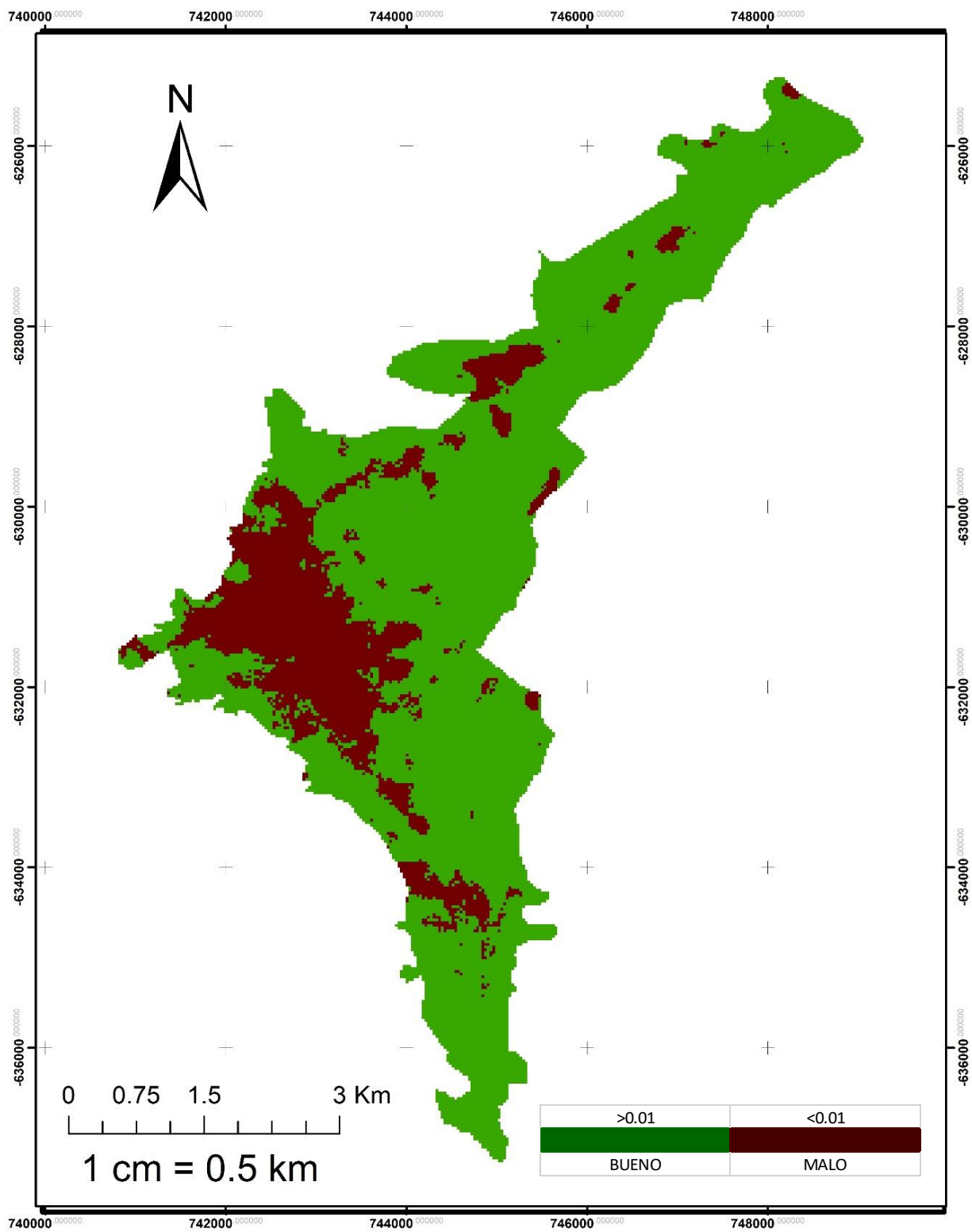


Figura 14. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 1995.

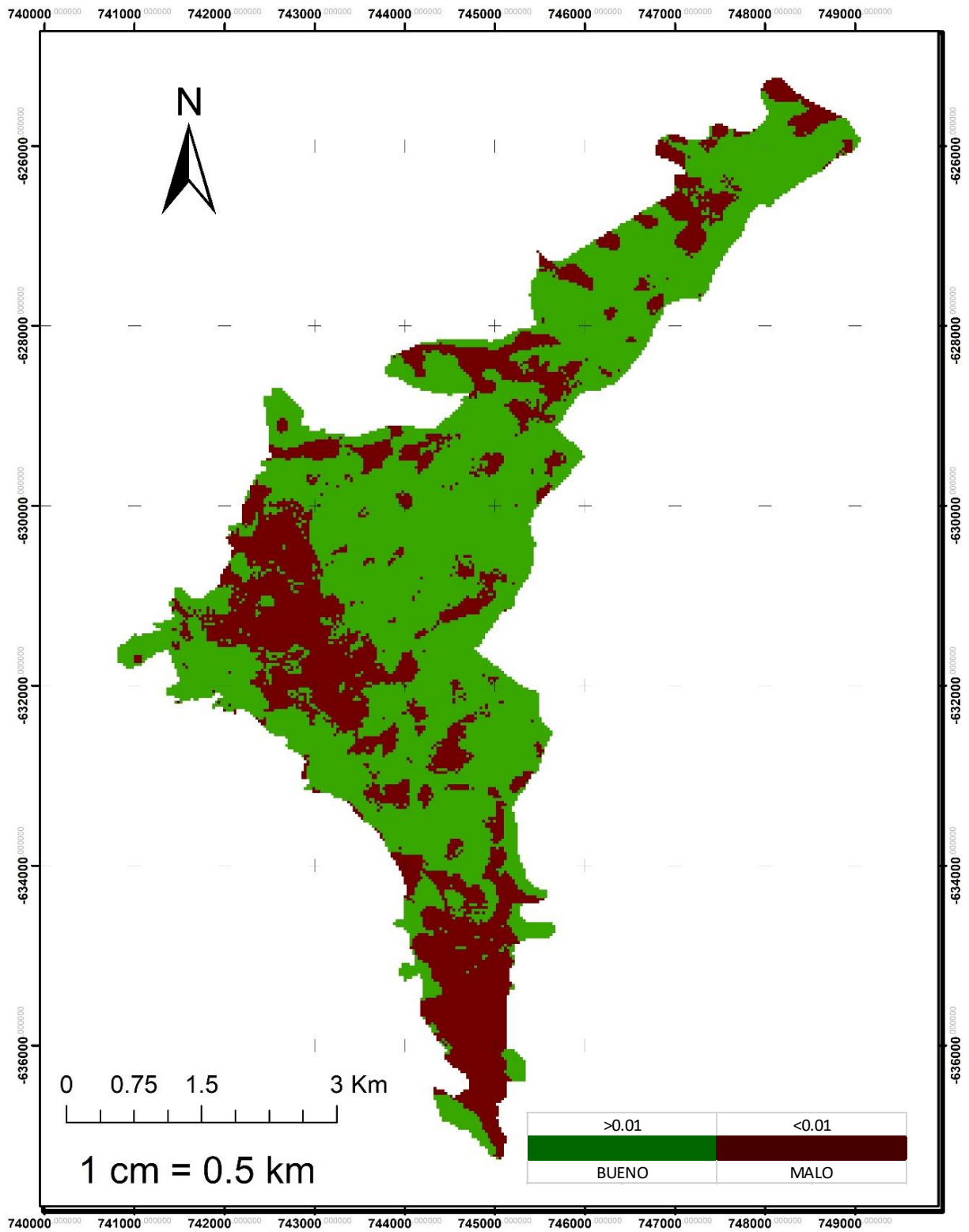


Figura 15. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2000.

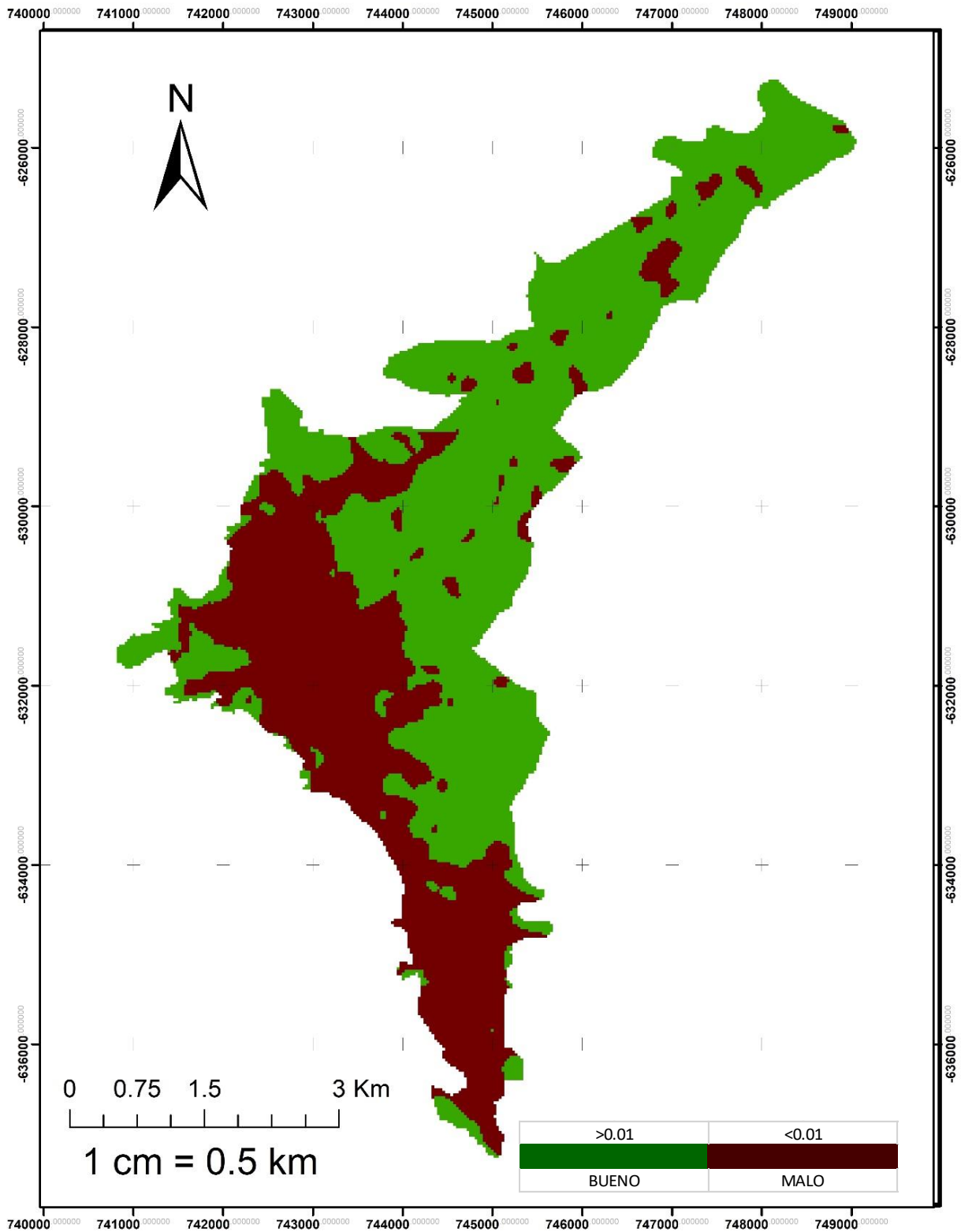


Figura 16. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2005

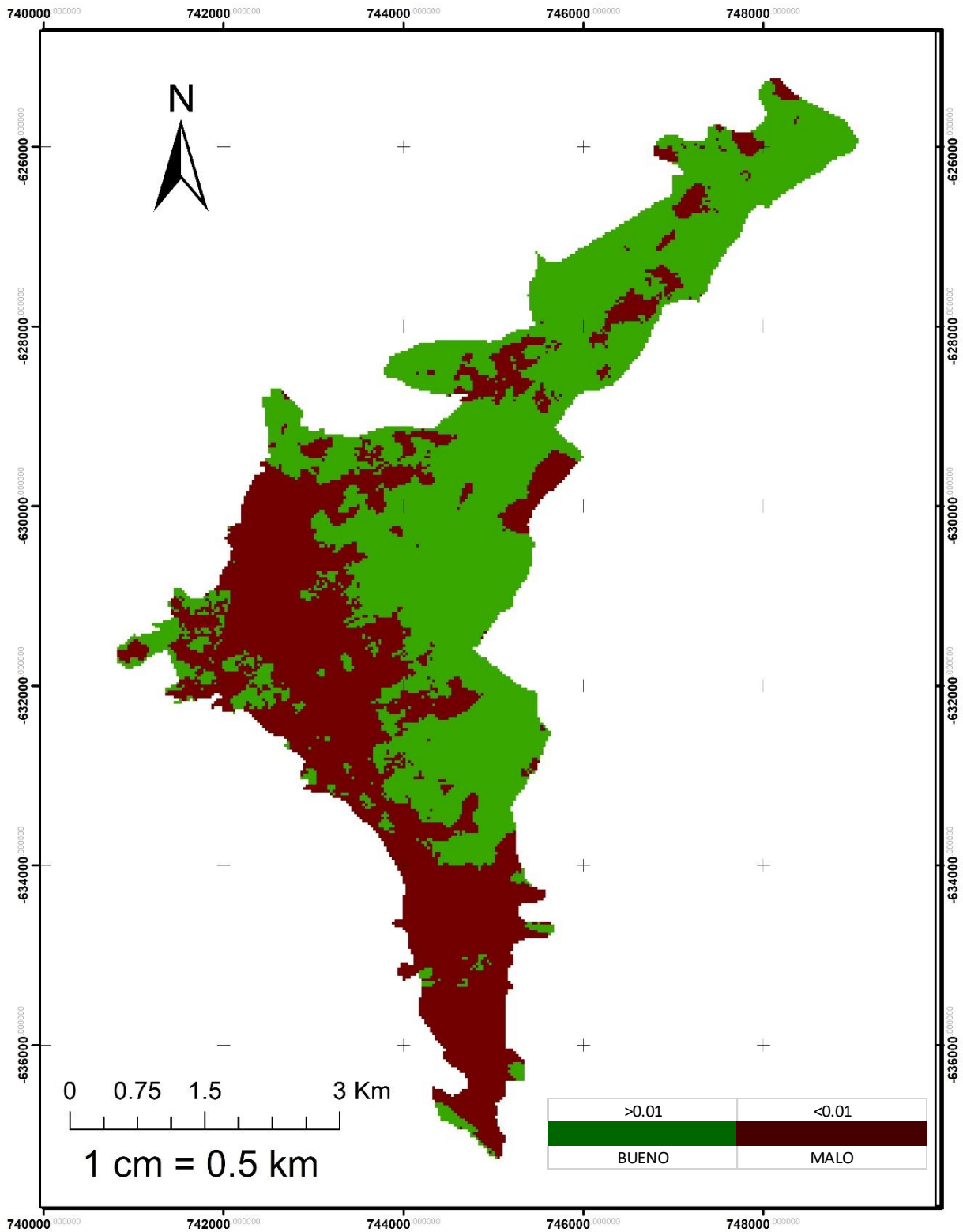


Figura 17. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2011.

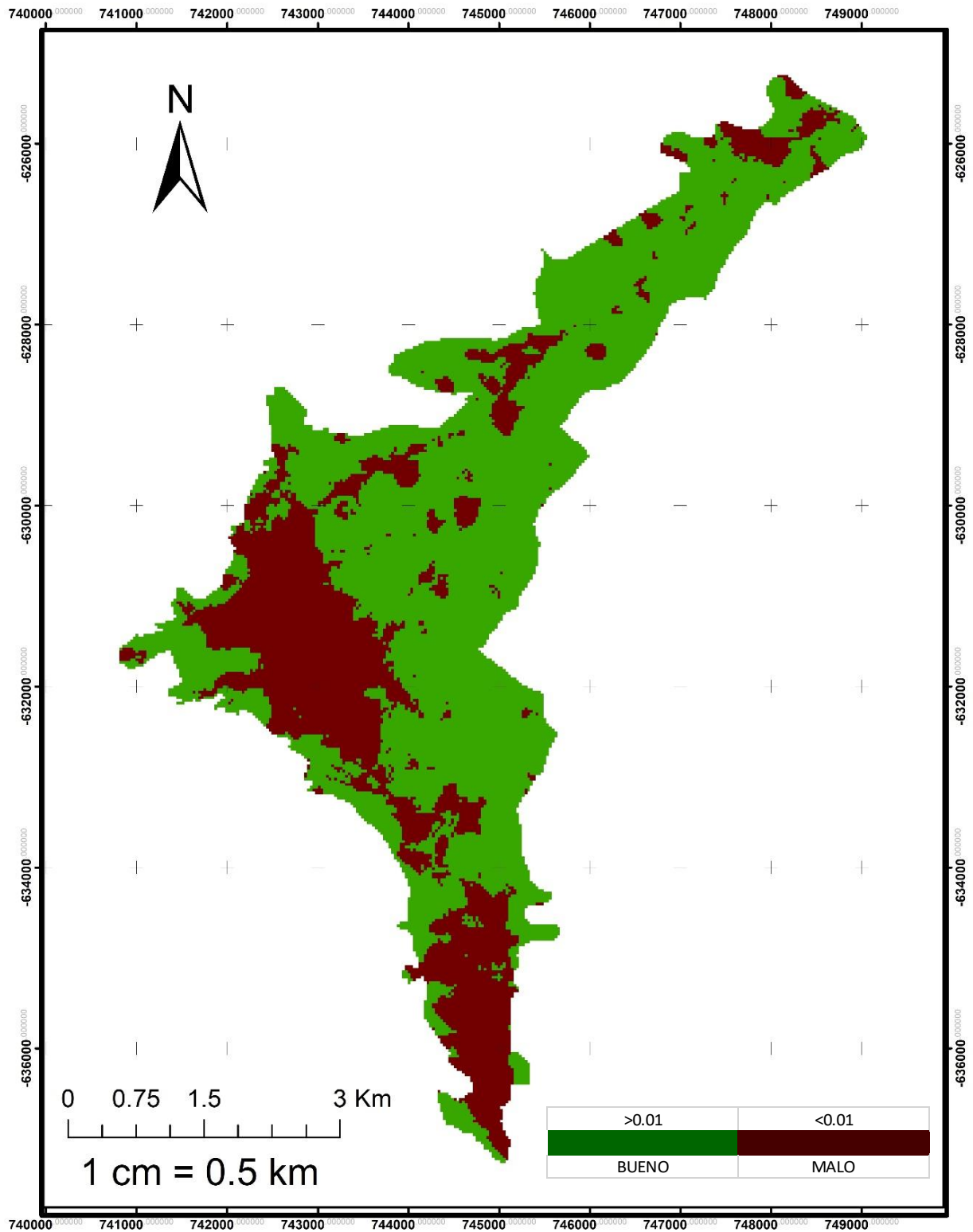


Figura 18. Evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén 2015.

La Figura 9 muestra las proporciones de la evaluación ecológica de la isla de calor urbano para la ciudad de Jaén, entre 1995 y 2015.

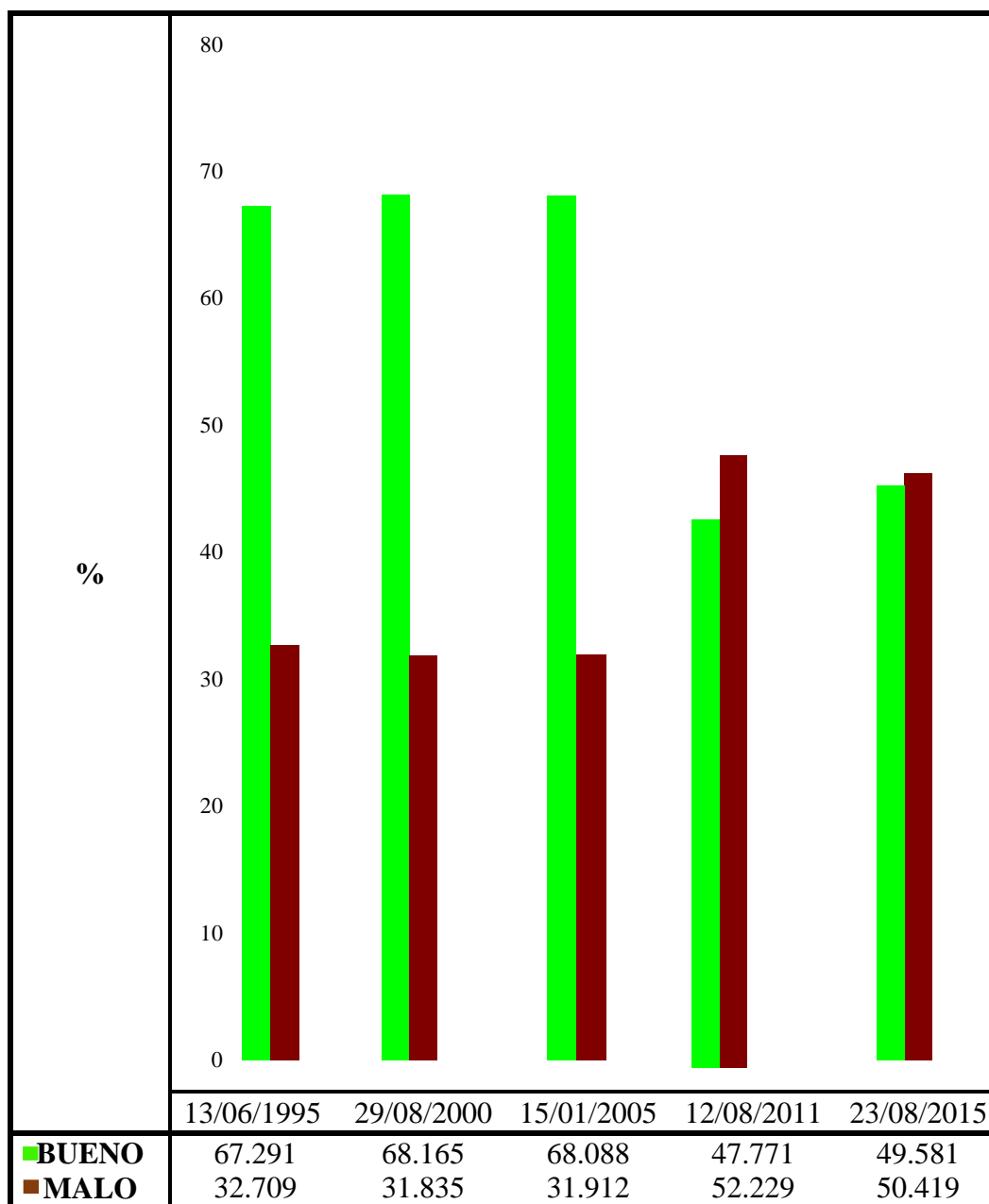


Figura 19. Proporciones de evaluación ecológica de islas de calor en la ciudad de Jaén entre 1995 y 2015.

La Figura 9 muestra la evaluación ecológica de islas de calor de diferentes fechas entre 1995 y 2015 para Jaén. Se observa cómo han ido creciendo las islas de calor, por lo tanto, las áreas verdes han disminuido y el crecimiento de las áreas

urbanizadas ha provocado la aparición de mayor cantidad de ICU. La evaluación ecológica del área no urbanizada, también presentan regiones como malas.

Los valores del índice de UFTVI menores a 0.01 indican áreas con presencia de vegetación, los valores superiores a 0.01 indica la presencia de ICU para ciudad de Jaén.

4.5. Estimación Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI).

En Tabla 13 se resumen los valores promedios de NDVI y NDBI de cada una de las capas.

Tabla 13. Valores promedio de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) 1995 a 2015.

FECHA	NDVI	NDBI
1995	0.420	0.084
2000	0.464	0.048
2005	0.452	0.023
2011	0.372	0.109
2015	0.470	0.099

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que en el año 2011 el NDVI disminuyó mientras que el NDBI aumentó. Los cultivos temporales varían según las condiciones climáticas, esto hace que haya un desbalance en los resultados del NDVI y NDBI para el área de estudio de la ciudad de Jaén.

4.5.2. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST.

Los perfiles topográficos permiten observar el relieve de una forma fácil para ver la tendencia de los índices, como se comportan en el área urbanizada y en áreas con vegetación como se muestra en la siguiente Figura 10.

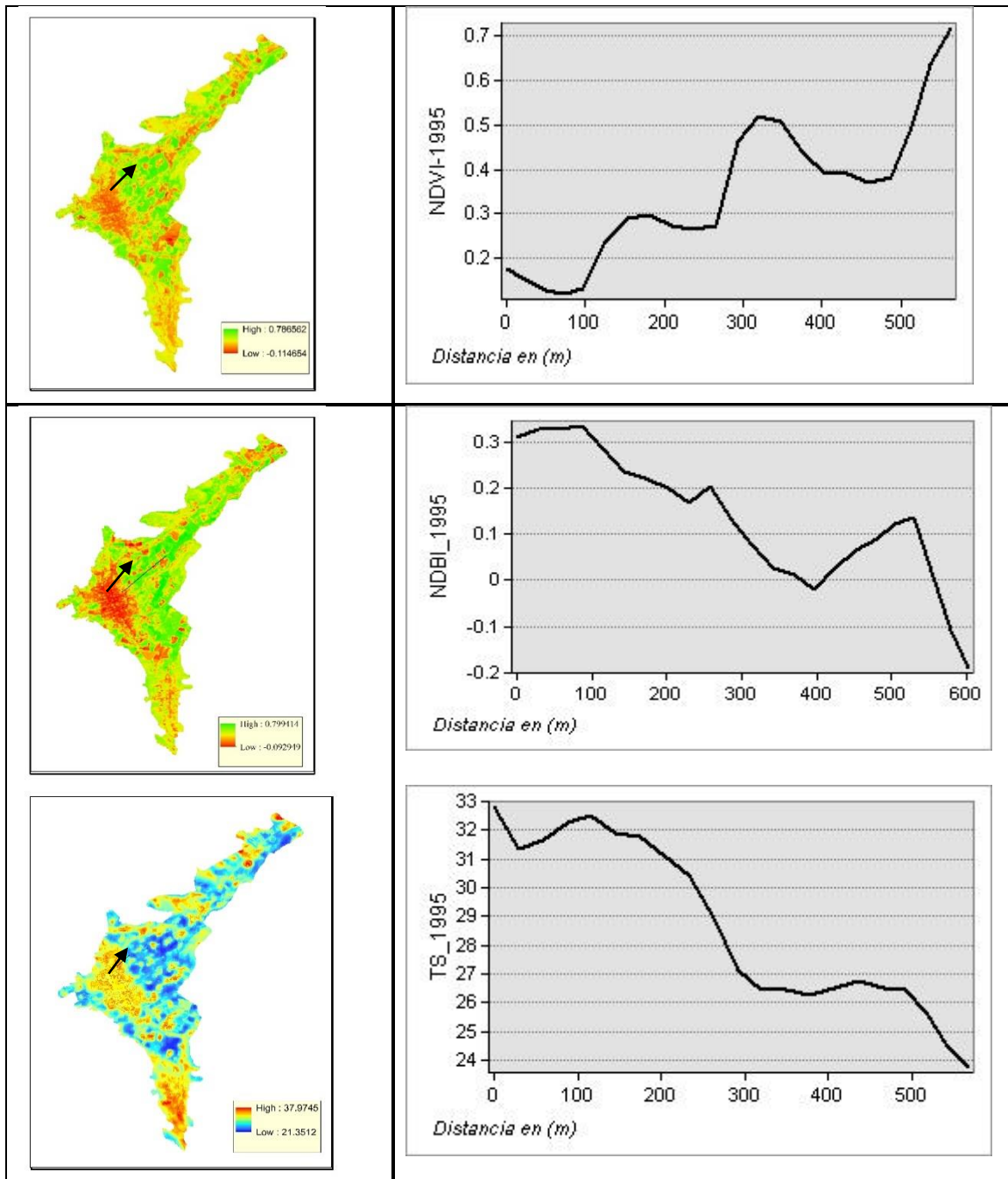


Figura 20. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST 1995

En la Figura 10 se observa que el NDVI es menor en el área urbanizada en comparación en áreas con presencia de vegetación, y es inversamente proporcional con el NDBI. La temperatura se comporta similar al NDBI en las áreas urbanizadas las temperaturas son más elevadas en comparación con las áreas que presentan una mayor vegetación. Los resultados de los perfiles

topográficos TST, NDVI y NDBI de las cinco imágenes analizadas se presentan en el anexo 1.

4.6. Análisis de correlación entre la temperatura de la superficie de la tierra (Ts), NDVI y NDBI.

Para relacionar los efectos de las áreas urbanizadas y las áreas con predominio de vegetación natural, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, determinado para los valores de temperatura de la superficie de la tierra (TST), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) para la ciudad de Jaén entre los años 1995 a 2015.

Tabla 14. *Valores del coeficiente de correlación de Pearson.*

Coef. R	PERIODOS				
	1995	2000	2005	2011	2015
NDVI-TST	-0.763	-0.805	-0.715	-0.753	-0.813
NDBI-TST	0.853	0.852	0.799	0.838	0.849
NDVI-NDBI	-0.769	-0.757	-0.590	-0.751	-0.851

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las correlaciones entre los parámetros TST, NDVI y NDBI de las cinco imágenes analizadas se presentan en la Figura 11.

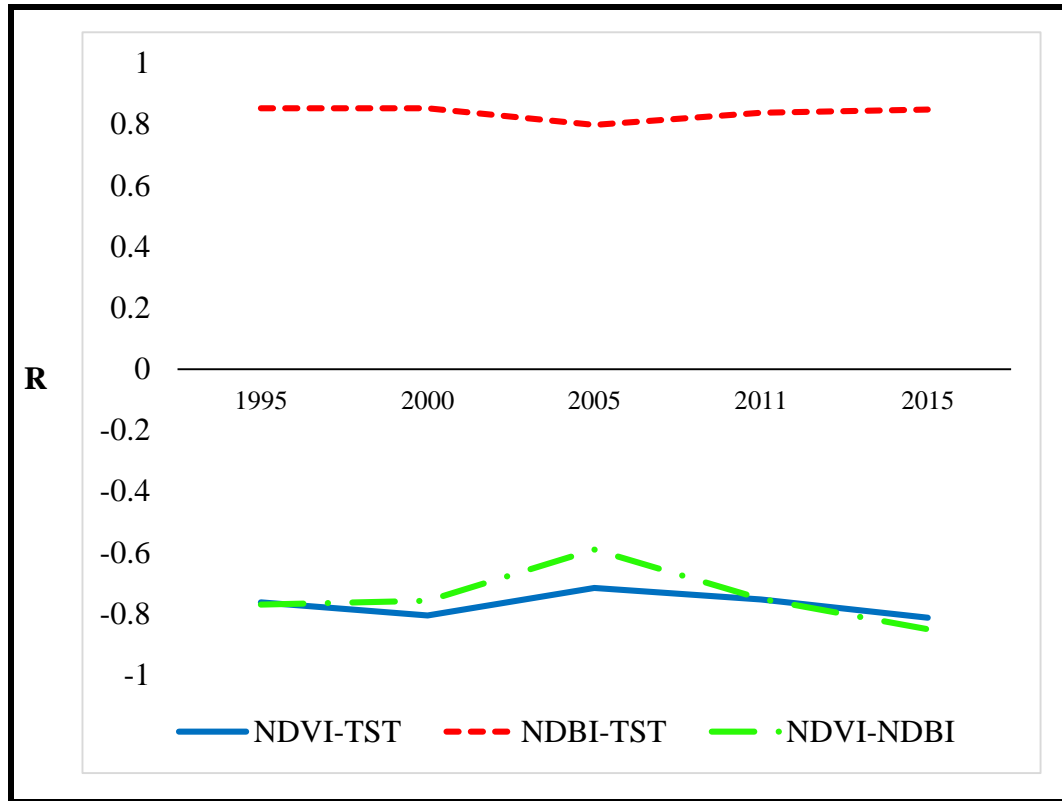


Figura 21. Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre la temperatura de la superficie terrestre (TST), NDVI, NDBI para la ciudad de Jaén, entre 1995 hasta 2015.

En los resultados que muestra la Figura 11, se encontró para todas la imágenes un coeficiente de correlación negativo entre la temperatura de la superficie de la tierra (TST) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), esto es un claro indicador que las áreas verdes o la vegetación pueden suavizar o reducir el efecto de la isla de calor urbano.

En el análisis de correlación, los resultados mostraron una influencia positiva del NDBI en el TST. Para los datos de imagen del 2005, se observa que los coeficientes de la correlación entre TST-NDVI y TST-NDBI fueron "más débil" pero siguió siendo negativa y positivo, respectivamente

V. DISCUSIÓN

A partir de los resultados de esta investigación se observa que la ciudad de Jaén presenta el fenómeno Islas de Calor Urbano. Este fenómeno ha ido en aumento en esta ciudad debido a la disminución de áreas verdes siendo estas reemplazadas por urbanización, la diferencia de temperaturas entre las áreas urbanizadas y las áreas con presencia de vegetación varía de 3 a 6 °C llegando a ser mayor en algunos puntos de la ciudad con presencia de vegetación más densa; esto también ha generado un incremento en la temperatura media de la superficie de la tierra de 3.844 °C en el transcurrir de los años 1995 al 2015.

Estos resultados son similares a los reportados por dos Santos *et al.*, (2017) que mostraron que los valores medios de TST en áreas urbanas eran al menos 2.34 a 7.19 °C más alta que las áreas no desarrolladas; así mismo, los evidenciados por Wang *et al.*, 2019, reportando que la TST de Shenzhen disminuye gradualmente de noroeste a sureste y que la TST de las superficies impermeables en las zonas urbanas son significativamente más altas que las áreas cubiertas de vegetación con una diferencia de 3 a 4 °C, mostrando así un importante efecto de isla de calor urbano.

En cuanto a la clasificación y el porcentaje de vegetación en el área de estudio, los datos arrojados se deben en su mayor parte a las áreas libres y áreas con vegetación residencial de la ciudad. La clase de arborización privada, con 10.816% de la superficie total del área delimitada, representa unos datos importantes para esta investigación porque fueron localizadas y delimitadas especialmente en las instituciones públicas como colegios y centros de salud.

El Índice de Área Verdes (IAV) que es la relación entre las áreas verdes y el número de habitantes de la ciudad, a menudo se utiliza como indicador de calidad ambiental; para la ciudad de Jaén fue 27.482 m² / habitantes, valor por encima del mínimo sugerido Organización Mundial de la Salud (OMS). Si bien el IVA obtenido es prometedor, es

importante destacar que este índice genera un valor para toda el área de estudio, y no a cada calle, barrio o sector. En este estudio, por ejemplo, la clase con mayor porcentaje se encuentra en los alrededores de la urbe, como zonas libres o vegetación residencial que aún no se construye sobre ellas, pero tienen la finalidad de construir en un futuro en la mayoría de ellas, es decir más del 86 % de la ciudad no se benefician, por tanto, no se encuentran en una situación de aumentar la calidad ambiental. Esto refuerza la importancia de una buena distribución del sistema de zonas verdes en las zonas urbanas. Las ICU también se presentan en las afueras de la ciudad, esto se debe a que en algunos lugares hay ausencia de vegetación por la presencia de suelos de cultivos, y algunas construcciones, aunque con menor incidencia, esto se puede apreciar en los sectores que se encuentran en los alrededores de la ciudad, que representan una gran parte del proceso de crecimiento con la aparición de subdivisiones y el establecimiento de nuevos barrios. Los sectores que se encuentran en los alrededores de la ciudad que están aún en crecimiento que tienen un buen número de áreas verdes, como Miraflores, Linderos, Magllanal, Las Palmeras, San Isidro, entre otros, presentaron islas de ablandamiento, es decir temperaturas mucho menores en comparación con los lugares céntricos.

Las variaciones fueron significativas en los diferentes años evaluados en la temperatura de la superficie de la tierra en la ciudad de Jaén, como también encontraron dos Santos *et al.*, (2017), en su estudio. A pesar de la heterogeneidad y las particularidades de los resultados, en general se observa que las temperaturas han ido en aumento provocando el fenómeno de las ICU, que se han expandido debido al crecimiento de la urbanización de la ciudad.

Liu y Zhang (2011) en Hong Kong, en su estudio de evaluación ecológica concluyó que el desarrollo urbano de manera desordenada y densa, genera una degradación ecológica y ambiental en grandes ciudades; así mismo, dos Santos *et al.*, (2017) en el municipio de Vila Velha, Brasil también obtuvo resultados similares con la misma clasificación. Las proporciones de evaluación ecológica en el área de estudio, se pueden deber a los ambientes con escasa vegetación y paisajes degradados como áreas de cultivo y áreas en construcción.

Los resultados de NDVI y NDBI obtenidos no nos muestran una tendencia clara es probable que se deba a la diferencia de vegetación, porque las imágenes procesadas son de diferentes años y en diferentes condiciones por tales razones hay un desbalance de vegetación. Los cultivos temporales varían según las condiciones climáticas, estas variaciones de vegetación temporal hacen que haya un desbalance en los resultados para el área de estudio de la ciudad de Jaén.

Así mismo, se encontró un coeficiente de correlación negativo entre la temperatura de la superficie de la tierra (TST) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), esto es un claro indicador que las áreas verdes o la vegetación pueden suavizar o reducir el efecto de la isla de calor urbano. En el análisis de correlación, mostraron resultados de una influencia positiva del NDBI en el TST, lo que indica que las áreas construidas influyen fuertemente en la aparición de las ICU. Asaeda, Ca, & Wake, (1996) afirman que el suelo construido influye fuertemente en el comportamiento térmico del medio ambiente, especialmente para áreas cubiertas con pavimento de asfalto, que absorbe más radiación solar.

Estos resultados guardan relación con lo que sostiene dos Santos *et al.*, (2017). Sus resultados mostraron la correlación positiva entre la TST y NDBI mostró un efecto amplificador de las áreas desarrolladas para ICU, mientras que las áreas con un predominio de la vegetación atenúan el efecto de ICU. Los centros urbanos, agrupados en algunas partes de la ciudad, recibió el peor índice de evaluación ecológica. Por último, la planificación del bosque urbano en los centros urbanos es necesaria para mitigar el efecto ICU y proporcionar confort térmico en las zonas urbanas.

(Wang, Liu, Tang, & Wang, 2019) Sostienen que las superficies impermeables y la vegetación urbana afectan a la TST y los componentes de presupuesto de calor de Shenzhen. Los hallazgos de la investigación muestran que una muy pequeña área de tierra verde urbana (cobertura de fracción de vegetación inferior al 4-8%) refleja una gran capacidad de disipación del calor. En la práctica de la construcción urbana, evitar áreas concentradas impermeables e incrementar las áreas verdes representan métodos efectivos para aliviar el efecto de isla de calor urbano. Este estudio ayuda a comprender mejor la optimización de los paisajes urbanos y el alivio del efecto isla de calor urbano.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El cambio de uso de suelo a una urbanización desordenada en la ciudad de Jaén que ha repercutido en la variación de temperatura, teniendo como resultados un incremento de 3 °C en la temperatura local de la superficie de la tierra, formando Islas de calor urbano, principalmente en la zona céntrica donde se ubican centros comerciales y poblados antiguos.
- La existencia de vegetación en las zonas urbanas reduce el efecto de islas de calor y la construcción o urbanización influye en el incremento de temperatura debido a los materiales con los que se construye como el concreto en las casas o edificios.
- La metodología llamada algoritmo de *mono-window* permitió identificar el fenómeno de Isla de Calor Urbana en la clasificación de la temperatura de la superficie de la tierra (TST), de la ciudad Jaén.

RECOMENDACIONES.

- Es necesario la elaboración de mapas y la identificación tanto de las áreas verdes como urbanas.
- Se sugiere hacer un estudio económico social para localizar los posibles lugares de mitigación del clima urbano con la finalidad de reducir consumo de energía existente (aire acondicionado) y disminuir la contaminación ambiental.
- Aunque los datos del sensor TM se pueden aplicar para analizar la distribución de las islas de calor urbanas, el método aún debe ser refinado con mediciones in situ para estimar TST en futuros estudios.
- Se recomienda para futuras investigaciones, tener en cuenta periodos más cortos para obtener un mejor grado de confiabilidad de la distribución espacial de la temperatura superficial de la tierra.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8).
- Asaeda, T., Ca, V. T., & Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(3), 413–427. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5).
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
- dos Santos, A. R., de Oliveira, F. S., da Silva, A. G., Gleriani, J. M., Gonçalves, W., Moreira, G. L., ... Mota, P. H. S. (2017). Spatial and temporal distribution of urban heat islands. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.275>.
- Dousset, B., & Gourmelon, F. (2003). Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(1–2), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(03\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(03)00016-9).
- Galindo Estrada, Ignacio Guillermo. Identificación y estudios de las islas urbanas de calor de las ciudades de Guadalajara y Colima, propuestas de 77 estrategias de mitigación. <http://www.conacyt.gob.mx/fondos/FondosSectoriales/CONAVI/Documents/8-IgnacioGalindo.pdf>.
- LI, J. Estimating land surface temperature from Landsat-5 TM. *Remote Sensing Technology and Application*, v. 21, p. 322-326, 2006.
- Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs3071535>.
- Lu, Y., Feng, X., Xiao, P., Shen, C., & Sun, J. (2009). Urban heat island in summer of Nanjing based on TM data. *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. <https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137628>.

- Markham, B. L., & Barker, J. L. (1985). Spectral characterization of the landsat thematic mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 6(5), 697–716. <https://doi.org/10.1080/01431168508948492>.
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719–3746. <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>.
- Schneider, K., & Mauser, W. (1996). Processing and accuracy of landsat thematic mapper data for lake surface temperature measurement. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11), 2027–2041. <https://doi.org/10.1080/01431169608948757>.
- Schott, J. R., & Volchok, W. (1985). *Thematic Mapper Thermal Infrared Calibration*.
- Skoković, D., Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Julien, Y., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). *Calibration and Validation of land surface temperature for Landsat8-TIRS sensor*.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Munoz, J. C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, M., & Sòria, G. (2004). Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 215–230. <https://doi.org/10.1080/0143116031000115210>.
- Sun, Q., Tan, J., & Xu, Y. (2010). An ERDAS image processing method for retrieving LST and describing urban heat evolution: A case study in the Pearl River Delta Region in South China. *Environmental Earth Sciences*, 59(5), 1047–1055. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0096-3>.
- Van De Griend, A. A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1119–1131. <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>.
- Velásquez, T. H. W. (2016). *Estudio de los factores constructivos que originan el desarrollo*

de Islas de Calor y microclimas en espacios urbanos, casos de estudio localidad de Suba. Universidad Piloto de Colombia.

Wang, W., Liu, K., Tang, R., & Wang, S. (2019). Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 110, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>.

Yang, J., Qiu, J., 1996. The empirical expressions of the relation between precipitable water and ground water vapor pressure for some areas in China. *Sci. Atmos. Sin.* 20 (5), 620–626.

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos a Dios en primera instancia por habernos brindado sabiduría para poder afrontar cada uno de los retos que se presentaban y a nuestros queridos padres por su apoyo, consejos, comprensión, confianza y amor en los momentos difíciles, además de brindarnos valores y principios para poder conseguir nuestros objetivos.

AGRADECIMIENTO

Nuestro reconocimiento y agradecimiento al M.Sc. Elera Gonzales Duberlí, por el apoyo que nos ha brindado en este trabajo. Por el respeto a nuestras ideas.

Gracias por la confianza desde que asumió la asesoría. Así mismo, agradecemos a los docentes de la Universidad Nacional de Jaén que, de alguna manera, apoyaron en la elaboración de la tesis.

Gracias a nuestra familia, que siempre nos han prestado apoyo moral y humano en los momentos difíciles de este trabajo.

A todos muchas, Gracias.

ANEXOS

Anexo 1 Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS.

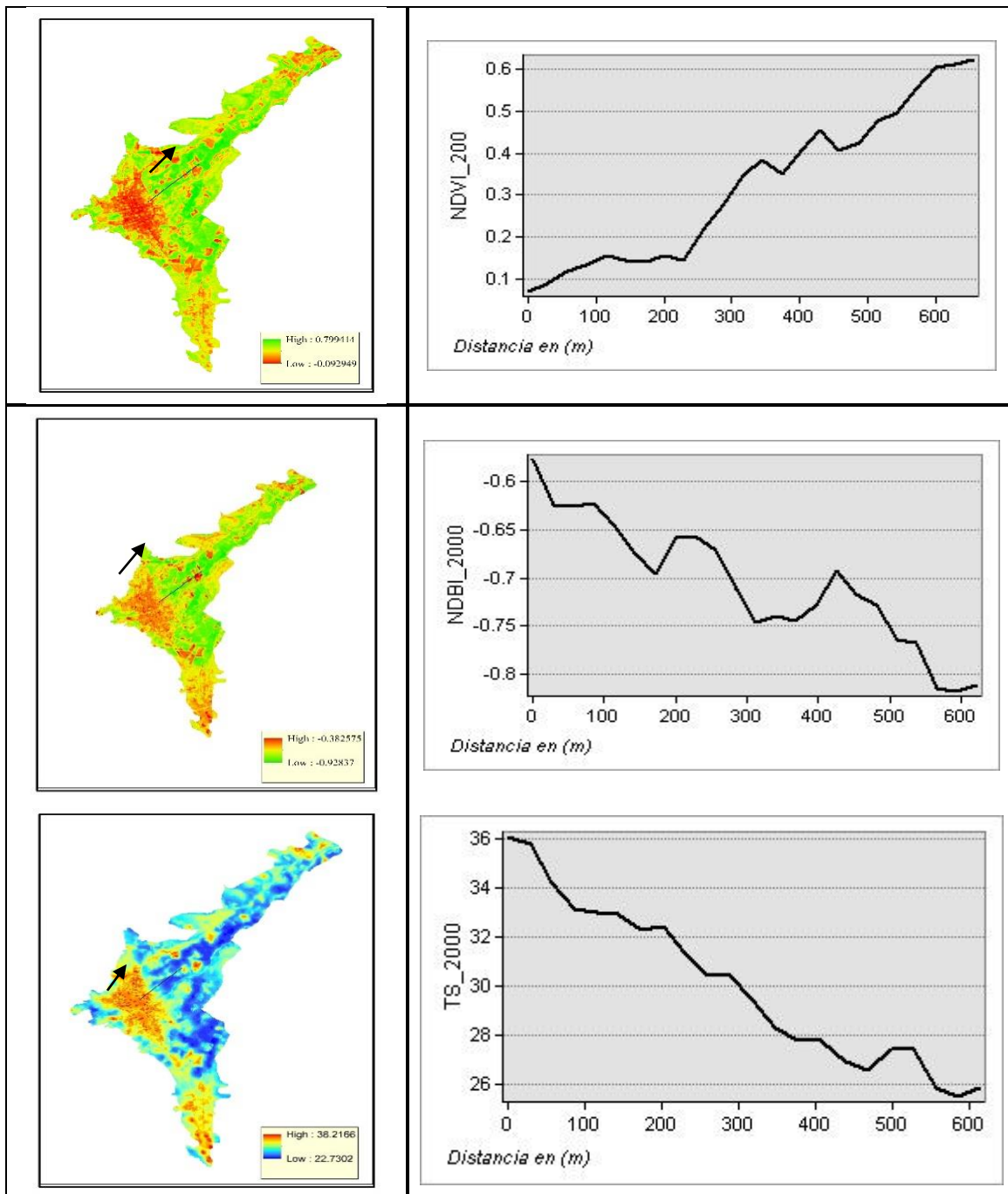


Figura 22. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TST 2000.

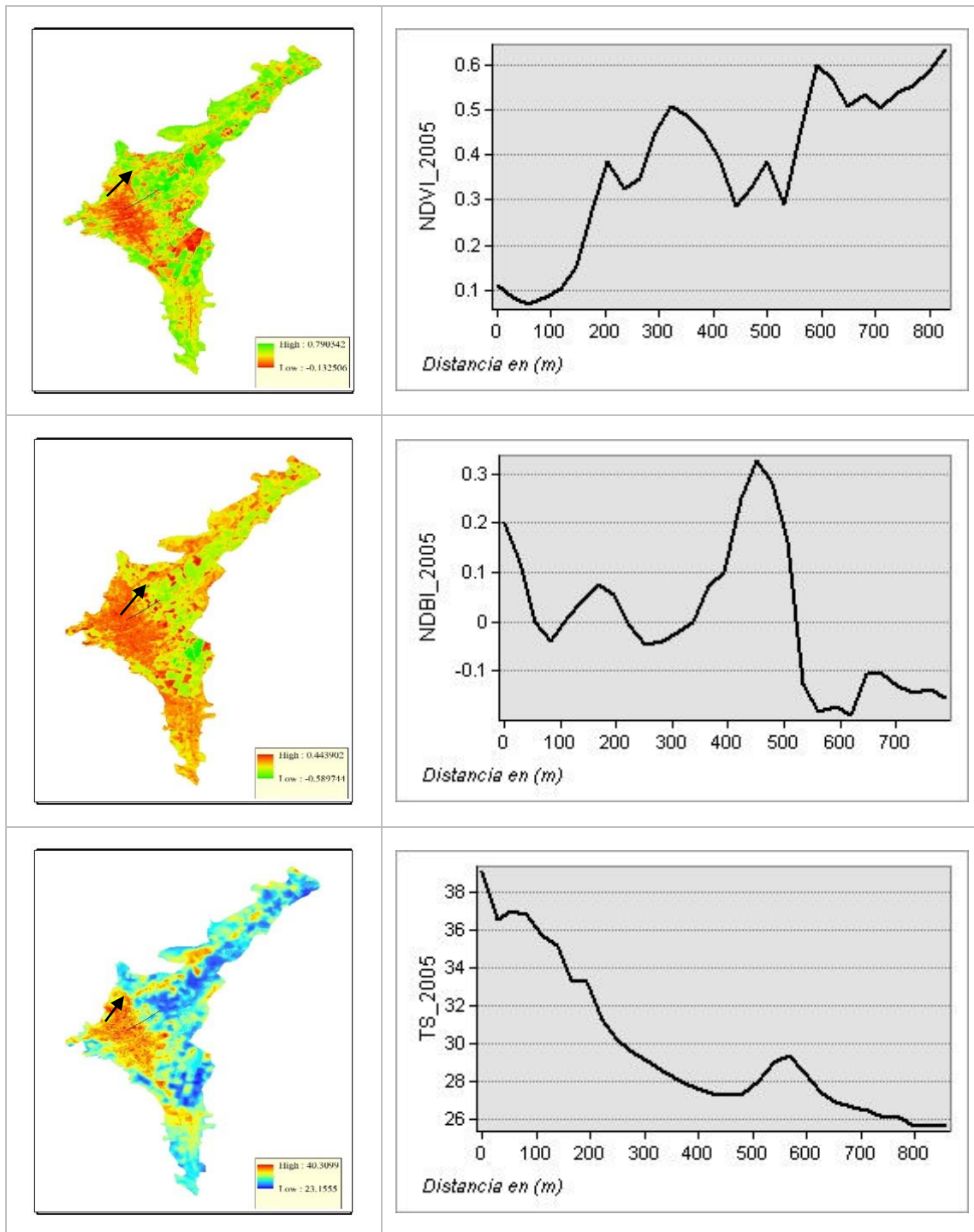


Figura 23. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2005

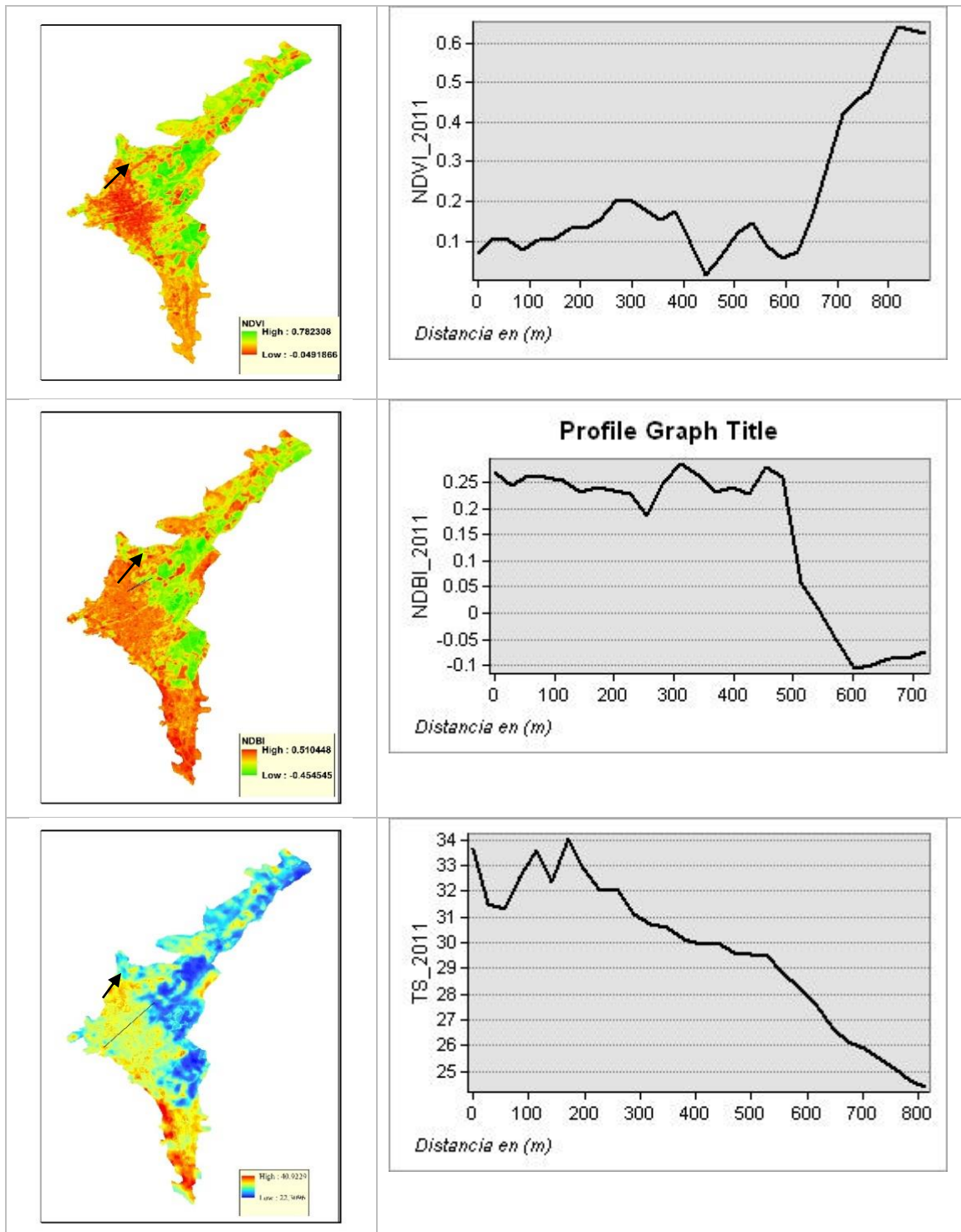


Figura 24. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2011.

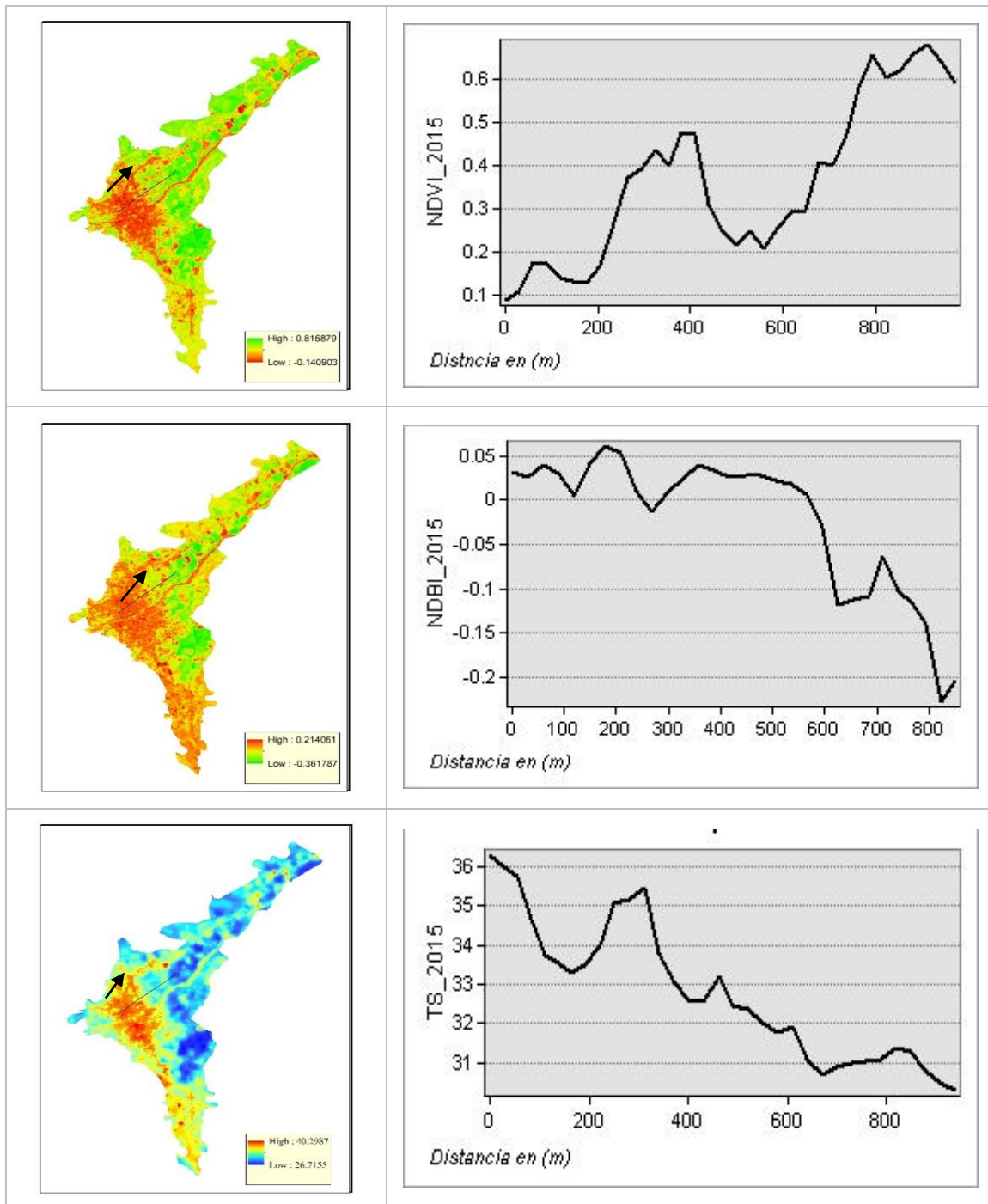


Figura 25. Perfiles topográficos de NDVI, NDBI y TS 2015.