

“UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA”
ESCUELA DE POSTGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
INGENIERIA



TESIS

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA
CIUDAD DE AYACUCHO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL
PERIODO 1986-1996-2006-2015.

PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA, MENCION GERENCIA DE PROYECTOS
Y MEDIO AMBIENTE

TESISTA: JOSE HUGO DE LA CRUZ FLORES
ASESOR: MG. WALTER MARIO SOLANO REYNOSO

AYACUCHO, PERÚ

2018

DEDICATORIA

A la memoria de don TEODOSIO, por su grandeza, ejemplo de lucha y tenacidad;
Y a la nobleza y humildad de doña EUGENIA, han descifrado el enigma del tiempo y el significado del mismo.

- MIS PADRES -

A Digna y a mis hijos: Hugo Pavel, Sarita Nilda, José Eduardo y Kelly Patricia; POR
TODO CUANTO DE TIEMPO Y PACIENCIA LES HE ROBADO.

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mi agradecimiento a aquellas personas que, directa o indirectamente, han contribuido a la realización de este trabajo.

En primer lugar, a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por su apuesta en los proyectos de investigación científica y tecnológica y su financiamiento con recursos del FOCAM, gracias a la cual se ha creado el ambiente propicio para desarrollar el presente trabajo.

Un agradecimiento muy especial al Ingeniero Mg. Gualberto Machaca Mendieta por compartir experiencias y conocimientos que aprendí y que tanto ha contribuido a la redacción de esta Tesis.

A mi asesor Mg. Walter Mario Solano Reynoso por su orientación en la elaboración del tema sobre las últimas tecnologías en el mundo de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica cuyas herramientas han sido el soporte para el fortalecimiento de este trabajo.

RESUMEN

El fenómeno de isla de calor urbana (ICU) describe la influencia de las superficies urbanas en los patrones de temperatura en las zonas urbanas comparado con su entorno no urbano. Varios indicadores han sido sugeridos en diferentes estudios. En este trabajo, se presenta un procedimiento para crear el índice ICU y caracterizar los cambios temporales y su distribución espacial utilizando series de imágenes de los satélites Landsat 5-TM y Landsat 8-LCMD, a partir de las cuales se derivan parámetros que junto a datos de estaciones meteorológicas se utilizan en el modelo. En segundo lugar, para determinar las zonas que presentan el ICU se utiliza el Análisis de Componentes Principales (ACP) para explorar las correlaciones de todos los parámetros y estimar sus contribuciones a los factores que identifican a las zonas ICU. En tercer lugar, según los resultados del ACP, se seleccionan las variables ambientales y parámetros más adecuados para crear el índice ICU y representar en un mapa para los años 1986, 1996, 2006 y 2016. Finalmente, se determinó la relación entre tres tipos de morfología urbana y la temperatura de superficie, con datos de ACP y la superficie impermeable obtenido mediante el Análisis Lineal de Desmezcla Espectral a través de la transformación de fracción de máximo ruido.

Los resultados muestran que de 17 variables analizadas, 12 de ellas influyen en la formación del ICU y al asociarse en componentes, los 5 primeros tienen un porcentaje acumulativo alrededor del 95%, creando el índice ICU, mediante el cual se evidencia la existencia de ICU diurno y nocturno en la ciudad de Ayacucho, con inicio en el 2006 y con focos de calor claramente identificables en el 2016. También se encontró cambios térmicos para los años 1986 y 1996, pero estos cambios en estos periodos obedecen a variaciones climáticas locales y no se trata de un fenómeno ambiental producto de la aglomeración urbana. Se caracterizó la configuración térmica de la ciudad de Ayacucho, con mayores temperaturas en el centro y disminuyendo hacia el área periurbana, determinando una correlación fuerte y significativa entre TS y los tipos de morfología urbana.

Palabras claves: Isla de calor urbano, temperatura de superficie terrestre, variables ambientales, parámetros urbanos, cañón urbano, Análisis de Componentes Principales, análisis de desmezcla espectral.

SUMMARY

The Urban Heat Island phenomenon (ICU) describes the influence of urban surfaces on temperature patterns in urban areas compared to their non-urban environment. Several indicators have been suggested in different studies. In this paper, we present a procedure to create the ICU index and characterize the temporal changes and their spatial distribution using series of images of the Landsat 5-TM and Landsat 8-LCMD satellites, from which we derive parameters that together Meteorological station data are used in the model. To determine the areas that present the ICU, Principal Component Analysis (PCA) is used to explore the correlations of all the parameters and estimate their contributions to the factors that identify the ICU zones. According to the results of the ACP, the most appropriate environmental variables and parameters are selected to create the ICU index and represent on a map for the years 1986, 1996, 2006 and 2016. Finally, the relationship between three types of urban morphology and surface temperature, were determined with ACP data and the impermeable surface obtained by the Linear Analysis of Spectral Demixing through the maximum noise fraction transformation.

The results show that of 17 variables analyzed, 12 of them influence the formation of the ICU and when associating in components, the first 5 have a cumulative percentage of around 95%, creating the ICU index, through which the existence of ICU is evidenced diurnal and nocturnal in the city of Ayacucho, beginning in 2006 and with clearly identifiable hot spots in 2016. Thermal changes were also found for the years 1986 and 1996, but these changes in these periods are due to local climatic variations and not It is an environmental phenomenon product of urban agglomeration. The thermal configuration of the city of Ayacucho was characterized, with higher temperatures in the center and decreasing towards the peri-urban area, determining a strong and significant correlation between TS and the types of urban morphology.

Keywords: Urban heat island, land surface temperature, environmental variables, urban parameters, urban canyon, Principal Component Analysis, spectral demix analysis.

INTRODUCCIÓN

A nivel global las ciudades adoptaron un mismo patrón de crecimiento, uno de ellos es la concentración de gran parte de la población en forma desordenada en espacios urbanos y mucho de ellos son improvisados. Según el INEI (Censo 2007), en Ayacucho el 26% de su población se concentra en la ciudad de Ayacucho, lo cual representa el 73% de la población provincial de Huamanga, es decir 161 636 habitantes del departamento radican en la ciudad de Ayacucho.

El crecimiento desordenado de la ciudad ocasiona efectos en el clima al interior del área urbana, el cambio de cobertura natural y sobre todo de la vegetación en superficies impermeables (asfalto, concreto y edificaciones) alterando los flujos de energía, siendo los factores que producen la isla de calor urbana (ICU), y así como también se debe al aumento del parque automotor que provocan cambios importantes en las características térmicas al interior de la ciudad, donde la temperatura al interior del área urbana es superior con respecto a su entorno no urbano. La ICU es un fenómeno urbano de acumulación de calor, trayendo consigo otros efectos como el aumento en el consumo energético y de enfermedades asociadas a factores climáticos (Romero, et al., 2010)

Por otra parte, en los procesos de urbanización los puntos de monitoreo climático convencional e incluso las estaciones meteorológicas han quedado dentro de las islas de calor, registrando datos erróneos, que en lugar de la climatología local registra datos forzados por el régimen de la isla de calor. Por esta razón en este trabajo se aplica la Teledetección y el análisis multivariado de componentes principales como las técnicas que permita analizar esta problemática en la ciudad de Ayacucho. El análisis se centrará durante los meses secos (mayo a agosto) puesto que en este periodo es frecuente la incidencia de enfermedades asociados a problemas climáticos y cada año va en aumento. El análisis espacio temporal se desarrollará para los periodos 1986, 1996, 2006 y 2016.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
SUMMARY	v
INTRODUCCIÓN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
CAPÍTULO I : EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	22
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2.1. Delimitación espacial.....	23
1.2.2. Delimitación temporal	23
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3.1. Problema general.....	23
1.3.2. Problemas específicos	24
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.4.1. Objetivo general	24
1.4.2. Objetivos específicos.....	24
1.5. HIPÓTESIS	25
1.5.1. Hipótesis principal	25
1.5.2. Hipótesis específicos.....	25
1.6. VARIABLES.....	25
1.6.1. Variable independiente.....	26
1.6.2. Variables dependientes.....	26
1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	26
1.7.1. Justificación.....	26
1.7.2. Importancia.....	27
CAPÍTULO II : MARCO TEORICO.....	28

2.1. ANTECEDENTES	28
2.2. BASES TEÓRICAS	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1. Islas de calor urbano	29
2.2.2. La teledetección en estudios urbanos	33
2.2.3. La geoestadística	35
2.2.4. Interpolación.....	35
2.2.4.1. Nearest point (vecinos más cercanos).....	36
2.2.4.2. Moving average (promedio móvil)	36
2.2.4.3. Trend surface (tendencia de superficie)	37
2.2.4.4. Moving surface (superficie móvil)	37
2.2.4.5. Kriging ordinario.....	38
2.2.5. Análisis de componentes principales en estudios urbanos.....	38
CAPÍTULO III : MARCO METODOLÓGICO.....	44
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	44
3.2. CARACTERISTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
3.2.1. Clima	46
3.2.2. Geología	47
3.2.3. Geomorfología.....	47
3.2.4. Uso del suelo	47
3.2.5. Densidad poblacional	48
3.3. MATERIALES Y EQUIPOS	49
3.4. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	50
3.5. UNIDAD DE ANÁLISIS Y MUESTRA	51
3.6. DISEÑO Y ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN	51
3.6.1. Procesamiento de imágenes de satélite	53
3.6.1.1. Selección de imágenes de satélite	53
3.6.1.2. Tratamiento de imágenes de satélite	56
3.6.2. Información meteorológica	61
3.6.3. Cálculo de indicadores biofísicos y parámetros urbanos	62
3.6.3.1. Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)	62
3.6.3.2. Índice modificado de agua de diferencia normalizada (MNDWI)	63
3.6.3.3. Índice de suelo desnudo (BI).....	63
3.6.3.4. Albedo de superficie terrestre.....	64
3.6.3.5. Estimación de temperatura de superficie (TS)	64

3.6.4.	Cálculo de parámetros urbanos.....	68
3.6.4.1.	Índice de edificaciones de diferencia normalizada (NDBul).....	68
3.6.4.2.	Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada (NDBal).....	68
3.6.4.3.	Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas (EBBI).....	69
3.6.4.4.	Índice de suelo urbanizado (UI).....	69
3.6.4.5.	Factor de visión del cielo (Svf).....	69
3.6.5.	Estimación del Índice de Isla de Calor Urbano.....	70
3.6.6.	Análisis espacio temporal de ICU y Ts.....	71
3.6.6.1.	Análisis lineal de desmezclado espectral.....	71
3.6.6.2.	Estimación de reflectancia espectral de superficie impermeable....	75
CAPÍTULO IV : RESULTADOS.....		77
4.1.	Análisis de variables y su incidencia en el fenómeno de ICU.....	77
4.2.	Estimación del índice de islas de calor urbano.....	82
4.2.1.	Obtención de factores sintéticos a través del ACP.....	82
4.2.2.	Estimación del índice de islas de calor urbano (IICU).....	97
4.3.	Caracterización espacial y temporal del fenómeno de ICU.....	101
4.3.1.	Variabilidad temporal del ICU.....	101
4.3.2.	Distribución espacial del ICU.....	107
4.3.3.	Jerarquización de distritos según el ICU.....	118
4.4.	Comportamiento de la temperatura superficial y crecimiento urbano.....	119
4.4.1.	Patrones temporal y espacial de la temperatura superficial.....	121
4.4.1.1.	Comportamiento temporal de la temperatura superficial.....	121
4.4.1.2.	Distribución espacial de la temperatura de superficie.....	127
4.4.2.	Gradiente térmico y su relación con la expansión urbana.....	130
4.4.2.1.	TS y su relación con el crecimiento urbano.....	130
4.4.2.2.	TS y su relación con la morfología urbana.....	134
CAPÍTULO V : CONCLUSIONES.....		142
RECOMENDACIONES.....		143
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		144

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 3.1: Usos de suelo en la ciudad de Ayacucho. Fuente: Oficina de Catastro de la Municipalidad provincial de Huamanga, 2015.....	47
Tabla 3.2: Evolución de densidad poblacional entre 1981 y 2005.....	49
Tabla 3.3: Densidad poblacional por distrito al 2014.	49
Tabla 3.4: Características de bandas del Landsat 8-LCMD. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3.5: Fechas de adquisición de imágenes Landsat 5-TM y Landsat 8-LCMD.	55
Tabla 3.6: Información utilizada en la georreferenciación de las imágenes.....	58
Tabla 3.7: Coeficientes de calibración para Landsat - 5TM. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3.8: Irradiancia espectral solar exo-atmosférica. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3.9: Lista de las estaciones meteorológicas y datos utilizados en el estudio.....	61
Tabla 3.10: Valores promedio de reflectancias extraídos de bandas del Landsat-8, enmascarando con la fracción de albedo alto para el año 2016.	76
Tabla 4.1: Variables elaborados y analizados en el estudio de ICU, periodo 2016.....	77
Tabla 4.2: Correlación de variables analizados en el estudio de ICU.....	80
Tabla 4.3: Orden de incidencia de variables seleccionadas en la formación del fenómeno ICU.....	81
Tabla 4.4: Resultados del análisis de componentes principales para el año 1986.....	84
Tabla 4.5: Resultados del análisis de componentes principales para el año 1996.....	85
Tabla 4.6: Resultados del análisis de componentes principales para el año 2006.....	86
Tabla 4.7: Resultados del análisis de componentes principales para el año 2016.....	87
Tabla 4.8: Variación de TS diurno y nocturna por tipo de zona, 1986 al 2016.	126

Tabla 4.9: Diferencia térmica diurna y nocturna por tipo de bloque morfológico.
..... 138

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 3.1: Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	44
Ilustración 3.2: Mapa de distritos de la ciudad de Ayacucho. Fuente: Elaboración propia.	45
Ilustración 3.3: Acarreo de sedimentos de la parte alta de la quebrada San Martín. Fuente: INDECI, 2003.....	46
Ilustración 3.4: Ubicación de los puntos de muestreo para el registro de Ts.....	50
Ilustración 3.5: Esquema metodológico desarrollado en el análisis espaciotemporal de ICU. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 3.6: Flujograma de interpolación. Fuente: Adaptado de Moreno, 2012.....	53
Ilustración 3.7: Puntos de control sobre la Banda 4 del Landsat de 26.jul.1986.	58
Ilustración 3.8: Detalle de la imagen Landsat, en falso color 741, de julio 1986 antes (izquierda) y después de la corrección topográfica (derecha).	61
Ilustración 3.9: Aplicación de MNF en TerrSet y resultados para el 2016.	72
Ilustración 3.10: Diagrama de dispersión de componentes para la identificación de los Endmembers: (1) Vegetación, (2) Suelo, (3) Albedo alto, (4) Albedo bajo.	73
Ilustración 3.11: Píxeles de Endmembers seleccionados para el análisis.....	74
Ilustración 3.12: Firmas espectrales generados de los Endmembers.....	74
Ilustración 3.13: Fracción de Endmembers resultantes y su residual.	75
Ilustración 4.1: Formación de grupo de variables según el orden de incidencia en el fenómeno ICU durante el periodo 1986 y 2016.....	82
Ilustración 4.2: Porcentaje de la variación total explicada para el año 1986.....	90
Ilustración 4.3: Factores sintéticos establecidos para el periodo 1986.....	92
Ilustración 4.4: Factores sintéticos determinados para el periodo 1996.	93
Ilustración 4.5: Factores sintéticos determinados para el periodo 2006.	95
Ilustración 4.6: Factores sintéticos determinados para el periodo 2016.	96
Ilustración 4.7: Puntuaciones de IICU resultante para el año 2016.....	98
Ilustración 4.8: Índices de islas de calor urbano diurno de la ciudad de Ayacucho.	99

Ilustración 4.9: Índices de islas de calor urbano nocturno de la ciudad de Ayacucho.	100
Ilustración 4.10: Variación temporal del IICU diurno promedio y límites de rango.	103
Ilustración 4.11: Variación temporal de categorías de IICU diurno.	104
Ilustración 4.12: Variación temporal del IICU nocturno promedio y límites de rango.	105
Ilustración 4.13: Variación temporal de categorías de IICU nocturno.	106
Ilustración 4.14: Mapa de tendencia monótona de IICU, test de Mann-Kendall.	108
Ilustración 4.15: Índice ICU diurno rescalado en categorías de intensidad.	110
Ilustración 4.16: Índice ICU nocturno rescalado en categorías de intensidad.	111
Ilustración 4.17: Distribución espacial de categorías de ICU diurno.	113
Ilustración 4.18: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1986.	114
Ilustración 4.19: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1996.	114
Ilustración 4.20: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2006.	115
Ilustración 4.21: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.	115
Ilustración 4.22: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.	116
Ilustración 4.23: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1986.	116
Ilustración 4.24: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1996.	117
Ilustración 4.25: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2006.	117
Ilustración 4.26: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2016.	118
Ilustración 4.27: Dendrograma de la serie temporal de ICU diurno y nocturna.	119
Ilustración 4.28: Coeficientes r^2 en validación de TS para 1986 y 2016.	120
Ilustración 4.29: Coeficiente r^2 en validación de TS <small>medido insitu</small> versus TS Teledetectado para el 2016.	120
Ilustración 4.30: Serie temporal de TS diurno para el periodo 1986 a 2016.	122

Ilustración 4.31: Serie temporal de TS nocturno para el periodo 1986 a 2016.	124
Ilustración 4.32: Distribución de MP10 μm y MP2.5 μm para el año 2011. Fuente: Tesis de Lidia Machaca, 2011.....	125
Ilustración 4.33: Evolución temporal de Ts diurno y nocturno entre 1986 y 2016.	125
Ilustración 4.34: Distribución espacial de TS versus ICU para el 2016.....	129
Ilustración 4.35: Coeficientes r^2 en validación de TS versus ICU para el 2016.	130
Ilustración 4.36: Mapa de evolución urbana de Huamanga al 2015. Fuente: Municipalidad provincial de Huamanga, 2017.....	131
Ilustración 4.37: Mapa de tendencia Theil Sen de Mann-Kendall. Asociación TS y expansión urbana al 2016,	133
Ilustración 4.38: Coeficiente r^2 en asociación de TS y expansión urbana al 2016.....	134
Ilustración 4.39: Tipos de trama urbana y densidad de viviendas.	135
Ilustración 4.40: Resultado de regresión múltiple para tipología bloque alto... ..	137
Ilustración 4.41: Captura de pantalla de SkyHelios para el análisis de SVF....	139
Ilustración 4.42: Esquema de un cañón urbano (izquierda) y flujo del aire sobre el cañón urbano (derecha). Fuente: Oke, 1987.	140
Ilustración 4.43: Configuración geográfica de la ciudad de Ayacucho.	141

NOMENCLATURA DE ECUACIONES UTILIZADAS

1. CONVERSION DE VALORES DIGITALES A RADIANCIA

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

$$G_{rescale} = (LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / Q_{calmax}$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda}$$

Dónde:

L_{λ} = radiancia espectral obtenida por el sensor, $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,

Q_{cal} = nivel digital o valor del pixel, DN,

Q_{calmax} = máximo valor de pixel calculado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [DN],

$LMIN_{\lambda}$ = radiancia espectral mínima reescalada, Q_{calmin} [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$],

$LMAX_{\lambda}$ = radiancia espectral máxima reescalada, Q_{calmax} [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$]

$G_{rescale}$ = factor de rescalamiento de ganancia, [$(W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m))/DN$],

$B_{rescale}$ = factor de rescalamiento de sesgo, [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$].

2. CONVERSION DE VALORES DE RADIANCIA A REFLECTANCIA

$$\rho P = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s)$$

Dónde:

ρP = unidad mínima de reflectancia planetaria adimensional,

L_{λ} = radiancia espectral en apertura del sensor,

d = distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas,

$ESUN_{\lambda}$ = irradiancia solar exo-atmosférica solar media,

θ_s = ángulo cenital solar en grados.

3. CONVERSION A RADIANCIA EN EL TECHO DE LA ATMOSFERA (TOA)

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Dond: e

L_{λ} = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de ($Watts / m^2 * sr * \mu m$)

M_L = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

AL = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico 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 píxel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

4. ECUACION GENERAL DE CONVERSION A REFLECTANCIA

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Donde:

$\rho\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que $\rho\lambda'$ no contiene una corrección por el ángulo solar.

M_p = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

A_p = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Q cal = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de píxel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

CON CORRECCION PARA EL ANGULO SOLAR

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria o en el techo de la atmósfera TOA, con corrección por ángulo solar.

θ_{se} = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

θ_{sz} = Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$$

De este modo la ecuación general de conversión a reflectancia, incluyendo la corrección por ángulo solar quedaría de la siguiente manera:

$$\rho\lambda' = \frac{(M_p * Q_{cal} + A_p)}{\sin(\theta_{se})}$$

Donde:

$P\lambda'$ = Reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

M_p = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

A_p = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

$\sin \Theta_{se}$ = Es el 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 = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Conversión a temperatura de brillo en el satélite de las bandas TIRS pueden ser convertidas de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (K) usando la constante térmica contenida en el metadato, aplicando la siguiente ecuación:

5. CONVERSION A TEMPERATURA DE BRILLO

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente en grados kelvin (K)

L_λ = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA (Watts/(m²*srad* μ m))

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11). Los datos de las constantes térmicas k1 y k2, aparecen en el archivo de metadato.

:

6. INDICE DE VEGETACION AJUSTADO AL SUELO (SAVI)

$$SAVI = [(IRC - R) / (IRC + R + L)] (1 + L)$$

7. INDICE MODIFICADO DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (MNDWI)

$$NDWI = (Verde - SWIR_2) / (Verde + SWIR_2)$$

Gao (1996) establece un valor umbral de NDWI para la vegetación húmeda de 0.064 y Chen et al., (2006) plantea un valor mínimo apropiado de 0.05, por lo tanto, valores mayores indican un nivel más alto de humedad en las cubiertas vegetales y también la saturación de humedad del suelo, en este sentido, el valor umbral de MNDWI se definió en 0.11 para garantizar la selección de cubiertas con buena condición de humedad.

8. INDICE DE SUELO DESNUDO (BI)

$$BI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$$

9. ALBEDO DE SUPERFICIE

$$\alpha_{sp} = \alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance} / T_{sw}^2$$

$$T_{sw} = 0.75 + (2 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{altitud}$$

Donde, α_{sp} es el albedo de superficie, $\alpha_{path_radiance}$ es la porción de radiancia solar reflejada por la atmósfera, valor igual a 0.03 según la propuesta de Bastiaanssen (2000) y T_{sw} es la transmitancia atmosférica o la fracción de radiación solar incidente, que es transmitida por la atmosfera con su efecto de absorción y reflexión (Allen et al., 2002). El valor del albedo varía entre 0 y 1,

las superficies secas son de colores claros porque reflejan más con respecto a las superficies húmedas y áreas urbanas que absorben la radiación solar.

10. ESTIMACION DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (TS)

$$T_{\text{sen}} = [K_2 / \ln (K_1 / L_\lambda + 1)]$$

Donde:

T_{sen} = temperatura de brillo en grados Kelvin, para una radiancia L ,

K_1 = constante de calibración 1 en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,

K_2 = constante de calibración 2 en grados Kelvin,

L_λ = radiancia espectral del sensor.

TEMPERATURA CINETICA DE SUPERFICIE

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\epsilon} (\psi_1 L_{\text{sen}} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$$

Donde:

L_{sen} = radiancia termal a nivel del sensor,

T_s = temperatura de superficie terrestre (K),

T_{sen} = temperatura de brillo (K),

$b_\lambda = 1256k$ para Landsat-5, $1324k$ y $1199k$ para las bandas 10 y 11 de Landsat-8.

ψ_1, ψ_2, ψ_3 = Funciones atmosféricas,

W : Vapor de agua estimado con datos de estaciones meteorológicas,

Los parámetros γ, δ se determinan con las ecuaciones:

$$\gamma \approx \frac{T_{\text{sen}}^2}{b_\gamma L_{\text{sen}}} \quad \delta \approx T_{\text{sen}} - \frac{T_{\text{sen}}^2}{b_\gamma}$$

El cálculo de las funciones atmosféricas para la corrección por vapor de agua a través de las siguientes expresiones:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \quad \psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}; \quad \psi_3 = L_d$$

Para el cálculo de emisividad de coberturas se utiliza la ecuación propuesta por Jiménez y Sobrino (2003), cuya expresión para la condición de $0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5$ es el siguiente:

EMISIVIDAD DE COBERTURAS

$$E = f_v \varepsilon_v + \varepsilon_s (1 - f_v) + C_i$$

Dónde:

f_v = fracción de vegetación derivada del NDVI;

ε_v y ε_s = emisividades de las cubiertas de vegetación y del suelo. Para estos datos, los valores que se adoptan son 0.985 y 0.960, respectivamente.

C_i = efecto de cavidad debido a la rugosidad de la superficie.

EFEECTO DE CAVIDAD

$$C_i = ((1 - \varepsilon_s) \varepsilon_v) * G_f * (1 - f_v) + F_v$$

G_f es el factor geométrico que depende de la configuración de la superficie y cuyo rango varía entre 0 y 1, por lo general el valor recomendado es igual a 0.55.

El pixel es considerado como suelo desnudo cuando $F_v = 0$, cuando el $\text{NDVI} < 0.2$. En esta condición, la emisividad se estima mediante una correlación de reflectancia del infrarrojo cercano en la banda roja (ρ_{red}), la expresión es el siguiente:

$$E = a + b\rho_{\text{red}} \quad (F_v = 0)$$

Para obtener la fracción vegetal se utilizó la relación lineal propuesta por Wittich y Hansing (1995), utilizadas también con resultados aceptables por otros autores (Choudhury et al., 1994; Qi et al., 2000, Ramsey et al., 2004). La ecuación de dicha transformación se expresa como:

$$f_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_0) / (\text{NDVI}_{100} - \text{NDVI}_0)$$

Dónde:

fv = fracción de cobertura vegetal del suelo,
NDVI₀= índice correspondiente a suelo desnudo,
NDVI₁₀₀= índice correspondiente a una superficie completamente vegetada.

El cálculo del porcentaje de vegetación del suelo está en función del NDVI, el cual ha sido calculado utilizando la ecuación propuesta por Rouse et al. (1974) y se expresa como:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R})$$

11. INDICE DE EDIFICACIONES DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDBul)

El índice de bloque o construcciones de diferencia normalizada, propuesto por Roger y Kearney (2004), se utiliza para destacar las áreas construidas y el suelo desnudo, dado a que estas superficies son más reflectivas en el SWIR₁) que en el NIR. El índice se ha determinado mediante la ecuación:

$$\text{NDBul} = (\text{SWIR}_1 - \text{NIR})/(\text{SWIR}_1 + \text{NIR})$$

12. INDICE DE SUELO DESNUDO DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDBal)

$$\text{NDBal} = \frac{(B5 - B6)}{(B5 + B6)}$$

13. INDICE MEJORADO DE EDIFICACIONES Y AREAS DESNUDAS (EBBI)

$$\text{EBBI} = (B5 - B4)/10\sqrt{B5 + B6}$$

14. INDICE DE SUELO URBANIZADO (UI)

$$\text{UI} = \frac{(\text{SWIR2} - \text{NIR})}{(\text{SWIR2} + \text{NIR})}$$

CAPÍTULO I :

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Ayacucho se caracteriza por presentar zonas con alto grado de urbanización y de manera desordenada, con un crecimiento informal de viviendas en las zonas de expansión (Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Ayacucho al 2018), que han modificado de manera sustancial el clima al interior de la ciudad. La problemática del aumento de temperatura en las áreas urbanas es denominada como “Isla de calor urbana” (ICU), este fenómeno es ocasionado principalmente por sustitución de espacios naturales por espacios urbanos y por el incremento de las fuentes artificiales de generación de calor producto de actividades antropogénico (Oke, 1978).

La sustitución de áreas verdes y árboles por superficies artificiales y sobre todo impermeables tiene efectos directos e indirectos sobre la ICU, es un factor importante para la formación de la isla de calor y a la vez son indicadoras de degradación ambiental a escala local. Aunque el efecto de la isla de calor está presente en muchas ciudades, su intensidad varía de acuerdo a un gran número de variables como son: las condiciones climáticas, la topografía, la tipología de las edificaciones, los patrones constructivos de las urbanizaciones, y entre otros.

El incremento de temperatura al interior de la ciudad con respecto a los entornos rurales, como consecuencia de las alteraciones en el balance de energía, trae consigo serias consecuencias para la salud del hombre y de los ecosistemas. En el monitoreo de estos cambios, las fuentes convencionales de medición están diseñadas para conocer el clima en determinados puntos específicos pero impide establecer su distribución espacial y su relación con los componentes de la superficie urbana, es por ello se pretende realizar el presente estudio ya que la falta de conocimiento acerca de este tema puede traer problemas en el futuro, con respecto a tratar el cambio del clima urbano y trabajar en formas de mitigación a fin de promover un desarrollo urbano eco-compatible con el medio.

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Delimitación espacial

Esta investigación recopila y analiza la información referente al problema del fenómeno conocido como la isla de calor urbana en la ciudad de Ayacucho, abarcando los distritos de Ayacucho, San Juan Bautista, Jesús Nazareno, Andrés Avelino Cáceres y Carmen Alto; provincia Huamanga, región Ayacucho.

1.2.2. Delimitación temporal

El tema de investigación es de trascendencia y actualidad, la isla de calor urbana aparentemente es de reciente desarrollo y está vigente más aún por el contexto del cambio climático, asimismo esta temática es nuevo en investigaciones ambientales desarrollados en la región de Ayacucho. El análisis se centra durante los meses secos (mayo a agosto), en estos meses el clima urbano influye directamente en la salud pública por la ocurrencia de frecuentes infecciones respiratorias y cada año en aumento. El análisis abarcará los periodos 1986, 1996, 2006 y 2016.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema general

¿Cómo las morfologías urbanas modifican los microclimas al interior de la ciudad, generando cambios térmicos en el área urbana de la ciudad de Ayacucho en los años 1986, 1996, 2006 y 2016?

En este sentido, se plantea determinar la existencia o ausencia de islas de calor urbana en la ciudad de Ayacucho, mediante la extracción y análisis de las variables físicas, ambientales y geoespaciales que originan el ICU, y así como la caracterización de la distribución espacial y dinámica temporal de este fenómeno con ayuda de los sensores remotos y la aplicación de estadística espacial.

1.3.2. Problemas específicos

- a) ¿Qué variables físicas, ambientales y parámetros urbanos caracterizan al fenómeno de la isla de calor urbana para la ciudad de Ayacucho?
- b) ¿Es posible establecer un indicador que ayude a cuantificar la exacerbación de calor para zonas urbanas, según el diferencial de temperatura urbano-no urbana?
- c) ¿Existe o no la isla de calor en la ciudad de Ayacucho, y cuáles son su intensidad, dinámica temporal y distribución espacial en función de las condiciones morfológicas urbanas de la ciudad de Ayacucho y su entorno rural?
- d) ¿Cuál es el comportamiento de la temperatura de superficie frente al crecimiento del área urbana en los periodos analizados con respecto a su entorno no urbano?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

El propósito del presente es determinar el análisis del fenómeno de isla de calor urbana en la ciudad de Ayacucho para los años 1986, 1996, 2006 y 2016

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Caracterizar las principales variables físicas, ambientales y parámetros urbanos que influyen la isla de calor urbana para la ciudad de Ayacucho.
- b) Crear y mapear un índice de isla de calor urbana para la ciudad de Ayacucho, para cuantificar los impactos de las zonas urbanas en la temperatura de superficie, con relación a las condiciones no urbanas.
- c) Determinar la existencia, intensidad, dinámica temporal y distribución espacial de la isla de calor urbana en función de las condiciones morfológicas urbanas de la ciudad de Ayacucho y su entorno rural.
- d) Determinar el comportamiento de la temperatura superficial frente al crecimiento del área urbana en distintos periodos y las características de impacto térmico urbano respecto a su entorno no urbano.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis principal

En la ciudad de Ayacucho ya se produce el fenómeno de la isla de calor urbana, un conjunto de indicios hacen suponer en la existencia del fenómeno en esta ciudad.

1.5.2. Hipótesis específicos

- a) El comportamiento de la isla de calor urbana de la ciudad de Ayacucho puede ser explicado por variables físicas y ambientales que actúan aumentando o disminuyendo la cantidad de calor.
- b) Bajo la perspectiva de reducción y resumen de datos, el análisis de componentes principales ofrece un claro entendimiento sobre las relaciones entre las variables.
- c) a partir del estudio del entorno urbano y la identificación de la influencia individual y en conjunto de los elementos físicos que los conforman, y de las variables ambientales que interactúan sobre dicho espacio.
- d) Las áreas urbanas que presentan mayor densidad de ocupación del espacio y menor cobertura vegetal, presentan los peores índices de calor urbana.
- e) La configuración térmica de la ciudad de Ayacucho debe presentar diversos focos de calor que se relacionan con la expansión urbana y las morfologías urbanas de alta densidad, y en consecuencia con la formación de fenómenos como las islas térmicas, con mayores temperaturas en los centros urbanos y menores valores en sus periferias y en el entorno rural.

1.6. VARIABLES

La isla de calor urbana se ha determinado mediante la creación de un índice a través del análisis de componentes principales (ACP). El ACP es una técnica multivariante que forma parte del grupo de métodos de independencia, no distingue entre variables dependientes e independientes, su objetivo consiste en identificar qué variables están relacionadas, cómo lo están y por qué (Salvador, 2000).

El ACP fundamentalmente trata de: i) identificar componentes o factores que sucesivamente explican la mayor parte de la varianza total; y, ii) buscar combinaciones lineales de las variables originales. Estas nuevas variables tienen la característica de estar incorrelacionada entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información), son ortonormales entre ellas de autovectores asociados.

1.6.1. Variable dependiente

La variable dependiente es el fenómeno conocido como la isla de calor urbana, que es la respuesta de la interacción de muchos factores, los cuales pueden ser catalogados como controlables e incontrolables.

1.6.2. Variables independientes

Las variables independientes se agrupan en los siguientes grupos:

- a) **Variable físico:** Altitud, pendiente y aspecto del relieve.
- b) **Variables meteorológicas:** Velocidad del viento, humedad relativa y presión de vapor de agua atmosférica y el Albedo superficial.
- c) **Variables ambientales:** Temperatura de emisión superficial (TS), Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI), Índice Modificado de Contenido de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de humedad en las hojas (LWCI).
- d) **Parámetros urbanos:** Factor de visión del cielo (SVF, Sky View Factor), Índice de Urbanización (IU), Índice acumulado de Construcciones de Diferencia Normalizada (NDBul), Índice Mejorado de Edificaciones y Áreas desnudas (EBBI), Índice de Suelo Desnudo (BI) y el Índice de suelo desnudo de Diferencia Normalizada (NDBal).

1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.7.1. Justificación

Su conocimiento es fundamental para la creación del índice de isla de calor urbana que permite identificar los lugares donde se modifica las condiciones climáticas y ambientales de la ciudad, que necesitan de una adecuada planificación urbana, como también identificar el cambio de uso del suelo que se deriva en modificaciones térmicas al interior de la ciudad.

La incertidumbre del conocimiento sobre la existencia o ausencia de la isla de calor urbana en un determinado lugar conlleva a que no se tomen medidas adecuadas a tiempo para mitigar dicho fenómeno. El estudio proporcionará información para ayudar a identificar y priorizar las áreas afectadas, así como también contribuirá a mejorar en la toma de decisiones.

Este estudio no propone medidas de mitigación o sugiere ciertas estrategias de control, ni evaluar su posible eficacia o efectos positivos y negativos; solamente se centra en identificar, caracterizar y cuantificar el fenómeno de ICU a través de un índice en la zona urbana en Ayacucho bajo las condiciones existentes.

1.7.2. Importancia

Los estudios del clima urbano son importantes no solo para generar el conocimiento necesario que coadyuve a conseguir un ambiente adecuado y sano para vivir, sino también para analizar y pronosticar las consecuencias que una urbanización no planificada puede tener en el clima a escala local, ya que tiene modificaciones a escalas menores que concierne al entorno inmediato de los objetos (Moreno, 1993; Moreno y Serra, 2016).

El análisis espacio temporal de la isla de calor urbana tiene notable importancia para la toma de decisiones políticas en la planeación urbana, permite el control y mitigación de este fenómeno, mejorar los usos del suelo, determinar el origen de fenómenos climáticos y promover un urbanismo sostenible. El clima urbano tiene importantes implicancias para la vida, que en contextos de una fuerte evidencia científica respecto al cambio climático, cobran aún mayor importancia.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES

El estudio del clima urbano es trascendente y de actualidad, pero no es nueva ni surgió recientemente. La conciencia ambiental urbana viene de mucho antes y se remontan a la civilización griega y romana. En el siglo V a. C, Hipócrates en su tratado “De los aires, de las aguas y de los lugares” ya mencionaba sobre el aire distinto de las ciudades; en el Siglo I, Anneo Séneca aborda la problemática ambiental de las urbes al referirse al aire pestilente de Roma, decía que provocaba hasta cambios de humor al abandonar la ciudad.

En la Edad Media, el hacinamiento y las ciudades amuralladas surgidos como sistemas defensivos producían alteraciones del aire, siendo Londres el ejemplo de contaminación para su época. En 1661, John Evelyn en su obra “Fumifugium” subtítulo “La nocividad del aire y el humo de Londres disipada”, publicó el primer tratado sobre contaminación atmosférica urbana cuando la revolución industrial no estaba en desarrollo.

Posteriormente, el francés Emilien Renou (1815-1902), comprueba el mismo efecto haciendo un estudio similar para la ciudad de Paris, donde compara la diferencia térmica entre la ciudad y el campo de los alrededores. A finales del siglo XIX, en los estudios urbanos se incorporan el uso de datos meteorológicos, las cuales permitieron analizar mejor las modificaciones del clima urbano, utilizada inclusive hasta la actualidad, aunque el empleo de datos de observatorios meteorológicos es muy limitado porque solamente permite conocer las diferencias térmicas entre puntos muy concretos (Martínez, 2014).

La primera obra moderna sobre el clima urbano aparece con Kratzer en 1937 y con la obra clásica de Chandler “The Climate of Cities”, impulsando estudios de la isla de calor urbana y luego en 1968 se realiza el “Simposio internacional sobre climas urbanos”. En 1970 la Organización Meteorológica Mundial promueve los estudios de climatología urbana centradas en el fenómeno de la isla de calor en ciudades de todos los continentes, siendo pioneros en Sudamérica el estudio de Gallego en Rio de Janeiro (1972) y en Sao Paulo el estudio de Lombardo (1985).

En Sudamérica el estudio de ICU poco a poco atrae la atención de los investigadores, en Colombia Santana (2007) realizó un trabajo orientado a calcular la temperatura de una ciudad y su relación con el NDVI, también estudios multitemporales del ICU utilizando la teledetección y la técnica de Análisis de Componentes Principales; en Chile con Pablo Sarricolea (2012) y así sucesivamente en los demás países. En el Perú el estudio de ICU es muy escaso o inexistente en publicaciones de revistas científicas especializadas, salvo contadas tesis realizadas en la Universidad Agraria la Molina y en la Pontificia Universidad Católica del Perú; al interior del país no se tiene conocimiento de estudios similares.

A lo largo de la historia los estudios de islas de calor urbana cada vez han ido complejizando respecto al uso de datos y de técnicas, integrando datos de estaciones meteorológicas, sensores remotos, procesamiento digital de imágenes satelitales y de radar. En cuanto al uso de técnicas también ha ido evolucionando, desde la toma de medidas meteorológicas a lo largo de un transecto, aplicaciones estadísticas multivariadas como el ACP, detección de cañones urbanos, etc. Por otro lado, las técnicas de redes neuronales y la lógica difusa, así como el uso de técnicas híbridas, son los que se avizoran en estudios futuros en identificación y caracterización de islas de calor urbana.

2.2. *Islas de calor urbana*

Generación de la isla de calor urbana

Como es de conocimiento, cuando las superficies constructivas y calles absorben una mayor cantidad de radiación solar, estas se calientan y reflejan energía calorífica al aire circundante, provocando una elevación de la temperatura local, Oke,(1978); Landsberg,(1981); Voogt et al,(2003); Rosenzweig et al,(2005), por lo que las zonas urbanas tienden a tener una mayor temperatura que las zonas circundantes o rurales, como resultado de las progresivas modificaciones de la superficie que incluye la sustitución de zonas verdes por edificios y calles.

El calor contenido y generado en las zonas urbanas proviene del Sol en forma de radiación solar, cuya emisión es compleja, una parte es absorbida por las estructuras urbanas y otra parte es reflejada al medio ambiente, agregando las diversas fuentes de calor antropogénico que emite directa e

inmediatamente al ambiente. La transferencia de calor y los procesos de conservación de energía, juegan un rol importante en el balance de calor del entramado urbano.

Las estructura urbanas: fachadas, cubiertas, suelo, zonas verdes, entre otros absorben y almacenan radiación durante el día, y esto lo hacen de diferente manera dependiendo de los materiales que lo conforman o constituyen, al atardecer, el medio ambiente comienza a enfriarse y la energía térmica almacenada en las estructuras es liberada en forma de flujo de calor.

Otros factores importantes a considerar en la generación de la ICU según Giridharan et al, (2004), son el Factor de visión del cielo y el Albedo. Por una parte la capacidad de liberar energía por la radiación de onda larga es reducido debido a la disminución del factor de visión y en consecuencia existe un almacenamiento de calor en las superficies constructivas de los edificios, por otra, la cantidad de luz reflejada es menor en comparación con la luz incidente, es decir el albedo es generalmente bajo en las zonas urbanas.

En cuanto a la densidad de la población, el estudio realizado por Hung et al, (2006) analizaron doce ciudades de Asia y correlacionaron el número de habitantes con el incremento de la ICU.

Según Kim et al, (2004) la densidad de población tiene dos efectos en la generación de la ICU, una directa, relacionada con el metabolismo de las personas, a mayor número de personas es mayor el calor emitido por las mismas, y la indirecta, que influye de manera más significativa en el efecto de la ICU, pues a mayor población se incrementa el número de edificios, vehículos, fabricas, etc.

La falta de vegetación hace que también se presente el efecto de ICU. La investigación realizada por Kondoh et al, (1999), quienes demostraron que el decremento en zonas verdes en Tokio de 1972 a 1995 ha reducido la evapotranspiración en 38%, elevando de manera proporcional la temperatura urbana.

La contaminación del aire y altos índices de ozono también son causas de un aumento de ICU, de acuerdo con Rosenfeld et al, (1998), las partículas de los aerosoles que son abundantes en grandes ciudades, pueden

absorber y emitir radiación de onda larga, limitando la captación de radiación directa en las estructuras urbanas y generando un efecto invernadero en la ciudad y por tanto se presenta una elevación de la temperatura urbana.

También existen variables temporales como las condiciones climáticas y anticiclónicas que incrementa la ICU, Pongracz et al, (2006), por ejemplo la velocidad del viento y la cobertura de las nubes son factores que están directamente correlacionados con la elevación del efecto ICU, Kim et al, (2005)

Por su parte Klysik et al, (1999) han reportado que aun con velocidades de viento de 4 Km/seg. durante la noche y velocidades de 2Km/seg. durante el día, es posible apreciar el efecto ICU.

2.2.1. Isla de calor urbana superficial y calor atmosférico

En este tema, sobre el fenómeno de la Isla de calor urbana, se advierte fundamentalmente dos formas de manifestación espacial y ambiental: La isla de calor urbana superficial y la isla de calor urbana atmosférica, aunque en realidad, ambas son dos componentes de una misma unidad, que interactúan para formar este fenómeno climático local, Oke, (1986).

La isla de calor urbana superficial, se refiere a la presencia de temperaturas superficiales mayores en las zonas urbanas, en comparación de las zonas peri-urbanas o rurales. La herramienta fundamental de detección y análisis de estas islas de calor superficial, son las imágenes térmicas y presentan mayor variabilidad diurna, cuyas características en relación a la frecuencia, es que están presente todo el tiempo, durante el día y la noche, siendo más intensa durante el día y en verano, con respecto a la intensidad pico, es decir, la mayor intensidad de la ICU, mayor variación espacial y temporal, en el día: 10 a 15°C. y en la noche 5 a 10 °C., el método de identificación es a través de mediciones indirectas usando Sensores Remotos, cuya representación típica es la imagen térmica. EPA, (2008).

En cuanto a la isla de calor urbana atmosférica, se refiere a la presencia de aires más cálidos sobre las áreas urbanas, en comparación con las zonas peri-urbanas o rurales, se representa mediante Isotermas en mapas y

gráficos, para lo cual es esencial contar con estadísticas climáticas y una buena cobertura espacial de las redes meteorológicas urbanas, para registrar y monitorear estos eventos climáticos; presentan mayor intensidad nocturna que diurna, sus características, en frecuencia es de menor magnitud o ausente durante el día según la estación, más intensa en la noche o al atardecer y en invierno; menor variación espacial, pero mayor variación entre el día y la noche; día de -1 a 3°C, noche de 7 a 12 °C, el método de identificación a través de mediciones directas utilizando estaciones climatológicas o instrumentos móviles de medición, su representación típica es a través de mapas de isotermas o gráficos de temperatura. U.S. EPA. (2008).

2.2.2 Efectos de la isla urbanas de calor superficial

Varios trabajos de investigación (Elsayed, 2012; Santamoris, 2001) han demostrado que la Isla de calor urbana conlleva asociados un conjunto de efectos con incidencia directa sobre la población y que uno de los principales efectos recae sobre la economía, debido al incremento del consumo de energía para refrigeración de los edificios que tiene lugar en las ciudades, por ejemplo en Los Ángeles (EEUU), donde el aumento de demanda energética llega a suponer entre un 5 y 10% del total de la energía consumida, lo que se traduce en un costo adicional de cerca a los 100 mil dólares al año.

Otro efecto de la ICU está relacionado con la salud de las personas (Miron et al, 2007; Martínez et al, 2004), la exposición continuada en el tiempo a un ambiente con temperaturas elevadas provoca trastornos como el agotamiento por deshidratación, calambres, síncope, golpes de calor, la aparición de enfermedades cerebrovasculares.

Otro efecto más es el incremento de la mortalidad y la aparición de serios problemas respiratorios como consecuencia del aumento de los niveles de polución en la atmósfera (Ballester et al, 2003) que son producto de la acumulación de contaminantes (PM₁₀, humos negros, SO₂, NO, CO) debido a la imposibilidad de dispersarlos. (Sailor, 2004)

2.3. La teledetección en estudios urbanos

La Teledetección es aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre, sin tener contacto con ellas gracias a las aplicaciones y ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales (Chuvieco, 1996).

En las últimas décadas la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en recursos muy útiles para la gestión y ordenamiento de los territorios, además la información proveniente de sensores remotos, concretamente las imágenes de satélite, poseen un valor científico potencial para los investigadores de distintas áreas, entre ellos se puede mencionar la utilidad para el estudio de la dinámica urbana.

Si nos dedicamos a exponer brevemente los antecedentes en este tipo de estudios a partir de sensores remotos podríamos remontarnos a la época en que eran indispensables las fotografías aéreas. Los estudios realizados a partir de ellas están dirigidos básicamente hacia la morfología y comportamiento urbano o de cobertura del suelo en general. La **información** proporcionada por las fotografías aéreas a pesar de presentar numerosas ventajas como una alta resolución espacial, velocidad en la obtención de información para un área dada, entre otras; también presenta limitaciones como baja cobertura espacial, el fatigoso tratamiento visual, los errores geométricos introducidos por la perspectiva cónica y el complejo procedimiento de trasladar la información al plano, además de que el trabajo resultaba costoso y a veces se establecía una diferencia temporal importante entre la fecha de adquisición de la fotografía y la publicación del trabajo, esto alentó a que se buscaran nuevas alternativas. como la Teledetección (Zuleima, 2005).

La utilización de sensores espaciales en aplicaciones terrestres comienza en 1972 con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS, precursor del satélite Landsat, específicamente a través del sensor MSS, que posee una resolución espacial de 79 x 57 metros y cuatro bandas espectrales. A partir de 1984 se han utilizado los datos provenientes del sensor TM que posee una resolución espacial de 30x30 metros y siete bandas espectrales; desde 1986, los datos provenientes del satélite francés SPOT, cuya resolución espacial en modo multiespectral es de 20x20 metros y en modo pancromático de 10x10 metros y, recientemente (años 1999-2000), los datos del sensor ETM de la serie Landsat

que incorpora una banda pancromática de 15 x 15 metros y los datos del satélite IKONOS que posee 4 bandas en modo multiespectral con resolución de 4 x 4 metros, y una banda pancromática de 1 x 1 metro de resolución. Los últimos satélites de alta resolución espacial son el Quickbird y también el Geo Eye, ambos con detalle de información submétrica en el canal pancromático.

A partir de 1999, con la liberación tecnológica promovida en 1994 por el gobierno de los Estados Unidos de América, comienzan a ser utilizadas en el campo de las aplicaciones urbanas, las imágenes satelitales provenientes de numerosos satélites como los de la serie Landsat, SPOT, Sentinel 2 y 3, etc. Según Zuleima (2005), son varias las razones que pueden justificar el empleo de imágenes satelitales en los estudios urbanos y son:

- Posibilidad de actualizar información en cortos períodos de tiempo.
- Al aparecer en un formato digital el tratamiento que se realice es más ágil y rápido.
- La información es más barata y asequible, además hoy podemos obtenerlas a través de páginas web de manera gratuita.
- Al ser automatizados los procesos, hay más objetividad en los tratamientos.
- Da la posibilidad de comparar con otros ámbitos, pues el mismo sensor proporciona información similar sobre otras ciudades.
- Permite crear nueva información dado su carácter multiespectral, lo cual no es posible en otros documentos (fotografías aéreas o mapas).

Debido a estos beneficios en estudios urbanos, el empleo de imágenes satelitales se vuelve más fácil ya que se logra tener una visión general de las mismas y a diferentes escalas. El análisis además puede ser de carácter multitemporal, es decir estudiar el fenómeno en distintos momentos y establecer comparaciones ya que los satélites poseen cobertura global y periódica y una visión amplia que permite detectar grandes espacios. Otra ventaja es la de contar con imágenes en formato digital, lo cual facilita el trabajo, ya que el análisis digital de la imagen agiliza el proceso de interpretación, con una alta precisión.

2.4. La Geoestadística

La Geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales, su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos Myers, 1987 mencionado por (Giraldo, 2002). Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial que es un rasgo definitivo esencial de muchos fenómenos naturales y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989 mencionado por (Giraldo, 2002; Gallardo, 2006). Matheron, (1969) la define como la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales, dichos fenómenos los caracterizamos por la distribución espacial de una o más variables (ejm. Las leyes de un depósito o las cotas de una superficie topográfica), que denominamos como variables regionalizadas.

Gonzales (2003), la define como una ciencia aplicada que estudia las variables distribuidas espacialmente partiendo de una muestra representativa del fenómeno en estudio; basándose en el hecho de que los datos van a estar correlacionados espacialmente, esto es, que un dato va estar relacionado con datos cercanos, y esta dependencia va perdiendo fuerza a medida que nos alejamos del dato; además, complementa procesos de entendimiento que pueden traer consigo aproximaciones a la realidad que son útiles para tomar decisiones racionales (Kitanidis, 1997 mencionado por Román, 2007).

2.5.- Interpolación

Se puede definir como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición en el espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (Moreno et al., 2008; Castillo, 2008), convirtiendo datos puntuales a valores continuos (Dalence, 2013). La calidad de la interpolación depende de la confiabilidad, certeza, número y distribución de los puntos conocidos usados en el cálculo y en la precisión del modelamiento de la función utilizada; los valores desconocidos son calculados con esta función; el escoger el modelo apropiado, es esencial para obtener buenos resultados (Bakker, 2000).

Entonces todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos se encuentren dos puntos sobre la superficie terrestre más se parecerán y por tanto, los valores de cualquier variable cuantitativa que sea medida en ellos, serán más próximos a la realidad (Castillo, 2008). Los métodos de interpolación disponibles como modelos determinísticos se tienen: nearest point, moving average, tred surface y moving surface; y como modelo estocástico o probabilístico el Kriging (ITC, 2001; Moreno, 2012).

2.5.1. Nearest point (vecinos más cercanos)

La interpolación de vecinos más cercanos crea los denominados polígonos de Thiessen (o “polígonos Voronoi” o celdas de “Dirirchlet”) los cuales definen áreas de influencia individual por cada punto de un conjunto de puntos. Es una manera de extender la información puntual asumiendo que la mejor información, para ubicaciones sin observaciones, es el valor del punto más cercano de acuerdo a distancias euclidianas. Los puntos de ingreso en el mapa de puntos donde se interpolarán los valores para este método no necesitarán ser valores necesariamente; también se aceptan los mapas de puntos con un dominio clase, ID o booleano (Bakker, 2000; ITC, 2001; Moreno, 2012; Dalence, 2013).

2.5.2. Moving average (promedio móvil)

Este es un método local, es decir, el valor “z” de una localización puntual desconocida se estima desde localizaciones vecinas puntuales conocidas y, en la cual, los valores predichos se encuentran dentro del rango de los valores máximos y mínimos en la distribución. Asigna a las celdas (píxeles) los valores de puntos con peso promediado. Los factores de peso para los puntos son calculados por una función de peso especificada por el usuario. Los pesos pueden por ejemplo, igualar, aproximadamente, la distancia inversa de un píxel de salida. La función de peso asegura que puntos próximos a un píxel de salida obtengan pesos más grandes que puntos que se encuentran alejados. Además, las funciones de peso están implementadas de tal modo que los puntos que están más alejados de un píxel de salida, que la distancia limitante (limiting distance) definida por el usuario, obtengan un valor de cero; esto permite acelerar el cálculo y previene incongruencias. Se aplica este método cuando el análisis exploratorio de datos arroja existencia de datos extremos. Se utiliza distancia inversa (inverse

distance), en este método exacto, cuando hay una buena densidad de puntos y los mismos han sido medidos de forma muy exacta. Así mismo, se aplica disminución linear (linear decrease), cuando los puntos medidos tienen error, poca densidad (Bakker 2000; ITC; 2001; Moreno, 2012; Dalence, 2013).

2.5.3. Trend surface (tendencia de superficie)

Este es un método global, es decir, el valor de “z” de una localización puntual desconocida se estima con todos los valores puntuales conocidos. Calcula los valores de los pixeles ajustando una superficie a través de todos los valores puntuales en el mapa. La superficie puede ser de primer orden hasta el sexto orden. La elección polinómica depende del equilibrio que se desee entre la complejidad de las operaciones y el mejor o peor ajuste a los datos originales. El ajuste de la superficie se hace a través del ajuste de mínimos cuadrados. Este método es inexacto y se utiliza cuando se tiene pocos datos (Bakker, 2000; ITC, 2001; Moreno, 2012; Dalence, 2013)

2.5.4. Moving surface (superficie móvil)

Cuando se tiene datos más homogéneos, sin extremos, se aplica este método, el cual calcula el valor de los pixeles ajustando a una superficie cada punto de salida a través de los valores puntuales con un peso y una distancia limitante. Los factores de peso para los puntos son calculados por medio de una función de peso especificada por el usuario. Los pesos pueden, por ejemplo igualar, aproximadamente, la distancia inversa de un pixel de salida. La función de peso asegura que puntos cercanos a un pixel de salida obtienen pesos más grandes que puntos que se encuentran más alejados. Además, las funciones de peso están implementadas de tal modo que los puntos que se encuentran más alejados de un pixel de salida, que la distancia limitante definida por el usuario, obtengan un valor de cero; esto permite acelerar el cálculo y previene incongruencias. El ajuste de la superficie se realiza por los mínimos cuadrados. Este método es una combinación de la interpolación de tendencias de superficie y el promedio móvil (Bakker, 2000; ITC, 2001; Moren, 2012; Dalence, 2013)

2.5.5. Kriging ordinario

Es un método basado en auto correlación espacial de las variables, el Kriging es un estimador lineal insesgado que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos. Asume que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias; permite transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error.

Para determinar el auto correlación se usan semivariogramas y vecindades obtenidos a partir de un análisis exploratorio de los datos. El semivariograma permite a partir de la covarianza entre los puntos, representar la variabilidad de los mismos y su dependencia en función de la distancia y la dirección.

2.6. Análisis de componentes principales en estudios urbanos

Por otra parte, la aplicación de técnicas de análisis de componentes principales (ACP) en estudios urbanos utilizando datos de teledetección viene cobrando auge. La técnica del ACP ha sido desarrollado por Pearson a fines del siglo XIX, luego estudiado por Hotelling en los años 30 del siglo XX; Sin embargo han sido la aparición de los ordenadores y desarrollo de la Geociencias las que impulsaron su aplicación en estudios urbanos.

En particular para este estudio, como antecedentes, constituyen diversos trabajos en donde emplean indicadores obtenidos de imágenes satelitales y aplicación de técnicas multivariadas, podemos agrupar en 5 grupos de estudios:

- 1) Determinación y caracterización de clima y Islas de calor urbana (Yuan Bauer, 2007); Wong & Yu, 2005; Rosenzweig et al., 2005, Fei et al, 2007; Li et al, 2009),
- 2) Clasificación de uso del suelo (Dousset & Gourmelon, 2003; Buyantuyev, 2007);
- 3) crecimiento urbano (Wen, 2001); 4) densidad de población (Li & Weng, 2005).
- Y 5) evaluación de calidad y sostenibilidad ambientales (Romero & Vasquez, 2005; Fung & Su, 2000)

Desde el punto de vista de las técnicas de tratamiento de las imágenes las investigaciones han concentrado en índices o indicadores que muestran el estado y distribución de la vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la temperatura de superficie (TS) las más usadas.

Chander y Markham (2003) señalan que cuando se comparan imágenes de distintas fechas es ventajoso transformar los valores de radiancia en reflectancia porque se remueve el efecto producido por el ángulo solar y se compensan las diferencias en los valores de la irradiancia solar extra-atmosférica. La conversión de los valores DN a radiancia se realiza mediante la ecuación desarrollada por Chander y Markham (2003).

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

$$G_{rescale} = (LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / Q_{calmax}$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda}$$

Dónde:

L_{λ} = radiancia espectral obtenida por el sensor, $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,

Q_{cal} = nivel digital o valor del pixel, DN,

Q_{calmax} = máximo valor de pixel calculado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [DN],

$LMIN_{\lambda}$ = radiancia espectral mínima reescalada, Q_{calmin} [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$],

$LMAX_{\lambda}$ = radiancia espectral máxima reescalada, Q_{calmax} [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$]

$G_{rescale}$ = factor de rescalamiento de ganancia, [$(W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m))/DN$],

$B_{rescale}$ = factor de rescalamiento de sesgo, [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$].

Para convertir los valores de radiancia a reflectancia se utiliza la ecuación desarrollados por Chander et al. (2009). Esto es:

$$\rho P = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s)$$

Dónde:

ρP = unidad mínima de reflectancia planetaria adimensional,

L_{λ} = radiancia espectral en apertura del sensor,

d = distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas,

$ESUN_{\lambda}$ = irradiancia solar exo-atmosférica solar media,

θ_s = ángulo cenital solar en grados.

Los coeficientes utilizados para la calibración radiométrica de las imágenes han sido los publicados por Chander y Markham (2003) para Landsat-5TM, los mismos se muestran a continuación.

Tabla 3.1: Coeficientes de calibración para Landsat - 5TM.

Spectral Radiances, L_{MIN_λ} and L_{MAX_λ} in $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$								
Processing Date	From March 1, 1984				After May 5, 2003			
	To May 4, 2003							
Band	L_{MIN_λ}	L_{MAX_λ}	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	L_{MIN_λ}	L_{MAX_λ}	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$
1	-1.52	152.10	0.602431	-1.52	-1.52	193.0	0.762824	-1.52
2	-2.84	296.81	1.175100	-2.84	-2.84	365.0	1.442510	-2.84
3	-1.17	204.30	0.805765	-1.17	-1.17	264.0	1.039880	-1.17
4	-1.51	206.20	0.814549	-1.51	-1.51	221.0	0.872588	-1.51
5	-0.37	27.19	0.108078	-0.37	-0.37	30.2	0.119882	-0.37
6	1.2378	15.303	0.055158	1.2378	1.2378	15.303	0.055158	1.2378
7	-0.15	14.38	0.056980	-0.15	-0.15	16.5	0.065294	-0.15

Tabla 3.2: Irradiancia espectral solar exo-atmosférica.

Units: $ESUN=W/(m^2 \cdot \mu m)$		
Model:	Chance Spectrum CHKUR	
Band	Landsat 4	Landsat 5
1	1957	1957
2	1825	1825
3	1557	1554
4	1033	1036
5	214.9	215.0
7	80.72	80.67

La corrección de las imágenes del Landsat 8-LCMD, que son productos en formato de niveles digitales enteros (DN) con una resolución radiométrica de 16 bits. Estos han sido convertidos a valores de reflectancia en el techo de la Atmósfera (TOA) para las bandas 1 al 9 y radiación para las Bandas 10 y 11, con factores de escala contenidas en el metadato del producto.

Para la conversión a radiancia en el techo de la atmosfera (TOA) se utilizaron los coeficientes radiométricos del metadato, aplicando los algoritmos para el procesamiento de productos LCDM propuesto por la USGS-NASA (2013).

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Donde:

L_{λ} = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μm))

M_L = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

A_L = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico 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.

Para la conversión a valores de reflectancia (TOA) la ecuación utilizada para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia en imágenes del sensor OLI es:

$$\rho_{\lambda'} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}$$

Donde:

$\rho_{\lambda'}$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que $\rho_{\lambda'}$ no contiene una corrección por el ángulo solar.

M_{ρ} = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

A_{ρ} = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

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. Por tanto, la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA con una corrección para el ángulo solar es entonces:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

θ_{se} = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

θ_{sz} = Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$$

De este modo la ecuación general de conversión a reflectancia, incluyendo la corrección por ángulo solar quedaría de la siguiente manera:

$$\rho\lambda' = \frac{(M\rho * Q_{cal} + A\rho)}{\sin(\theta_{se})}$$

Donde:

$\rho\lambda'$ = Reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

$M\rho$ = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

$A\rho$ = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

$\sin \theta_{se}$ = Es el 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} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Conversión a temperatura de brillo en el satélite de las bandas TIRS pueden ser convertidas de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (K) usando la constante térmica contenida en el metadato, aplicando la siguiente ecuación:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente en grados kelvin (K)

L_λ = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA (Watts/(m²*srad* μ m))

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11).

Los datos de las constantes térmicas k1 y k2, aparecen en el archivo de metadato.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca la zona urbana de la ciudad de Ayacucho que comprende los distritos de Ayacucho, Carmen Alto, San Juan Bautista, Jesús Nazareno y Andrés Avelino Cáceres; situadas en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes a una altitud de 2,774 m.s.n.m., Latitud Sur: 13°08'51" y Longitud Oeste: 74°13'06". En el mapa que muestra abajo se ilustra el departamento de Ayacucho y se señala la provincia que constituye el área del presente estudio.

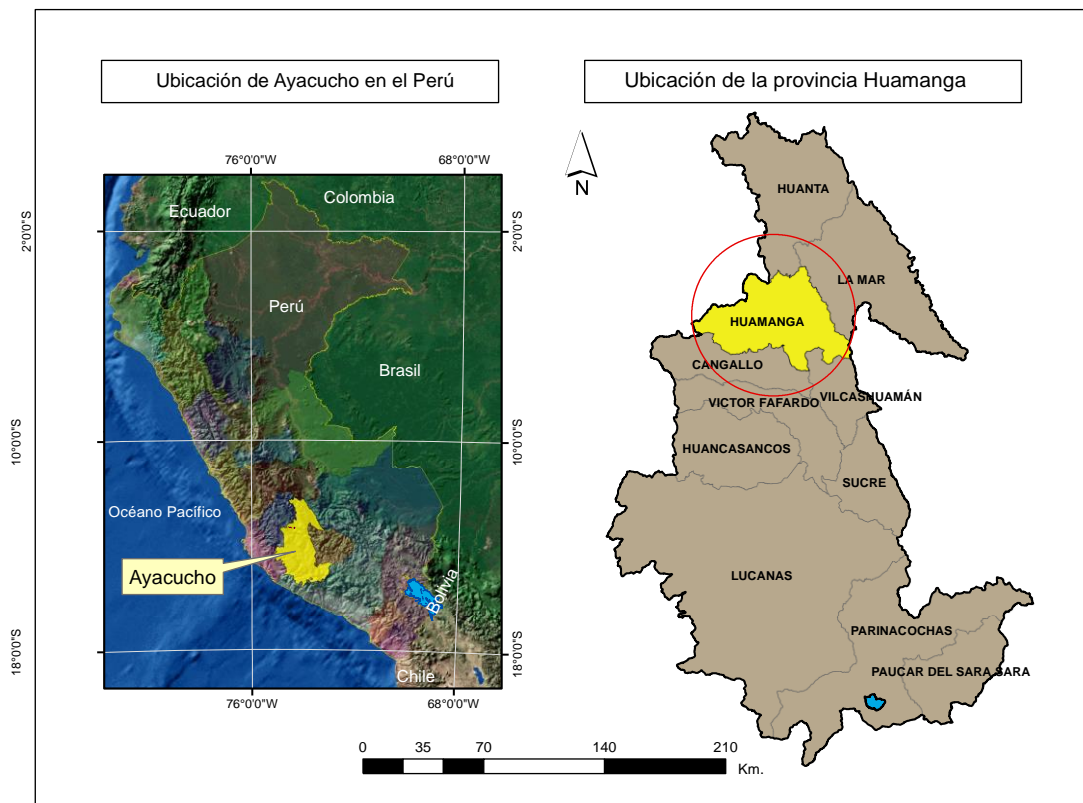


Ilustración 3.1: Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La ciudad de Ayacucho se ubica en la provincia de Huamanga, la cual limita por el por el Noroeste con la provincia de Angaraes, del departamento de Huancavelica; Norte con la provincia de Angaraes, del departamento de Huancavelica, y la

provincia de Huanta; por el Noreste con la provincia de La Mar; por el Este con la provincia de Chincheros, del departamento de Apurímac; por el Sur con las provincias de Vilcashuamán y Cangallo; por el Suroeste con la provincia de Cangallo y con la provincia de Huaytará, del departamento de Huancavelica. El mapa de los distritos de la ciudad de Ayacucho se muestra en la Ilustración 3.2

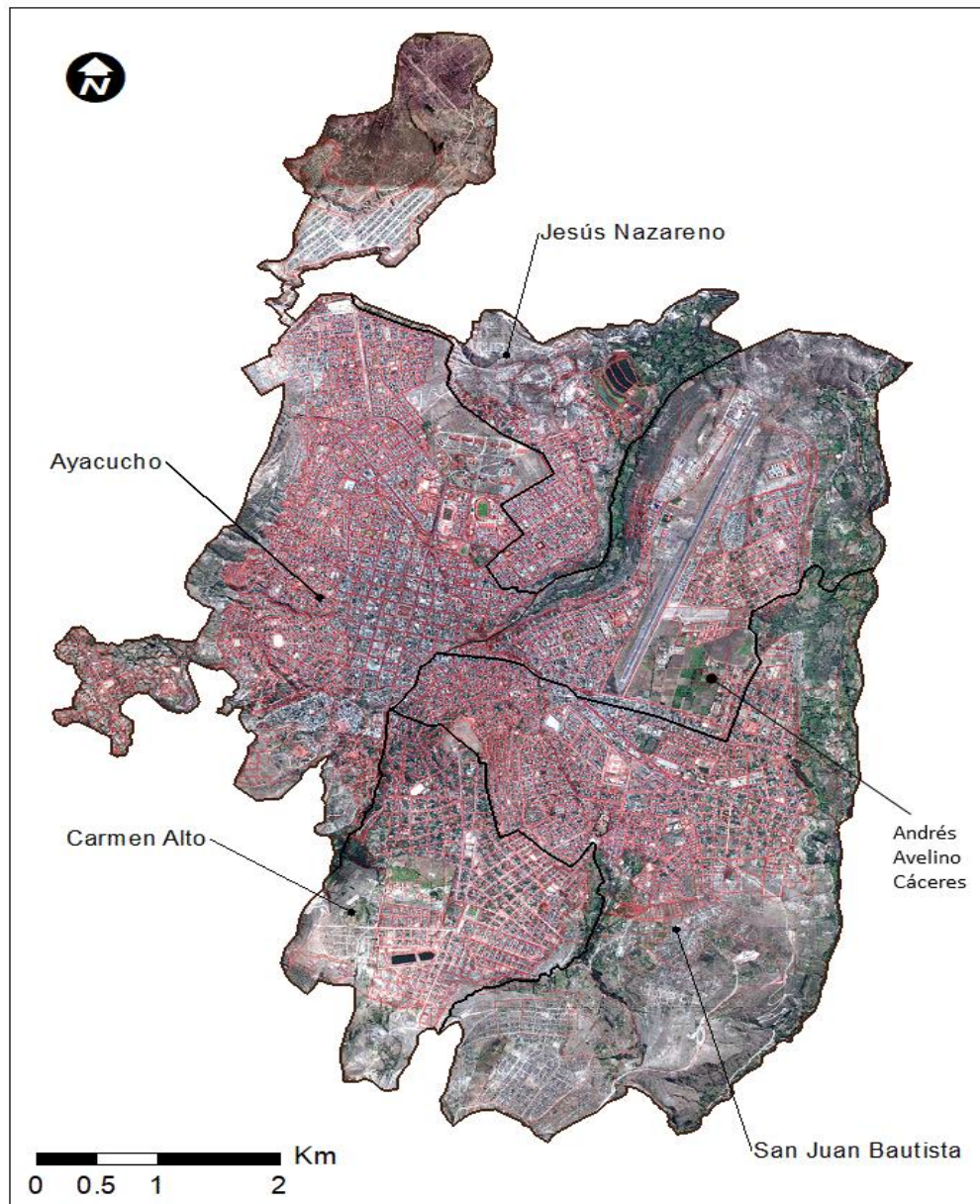


Ilustración 3.2: Mapa de distritos de la ciudad de Ayacucho. Fuente: Elaboración propia.

3.2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1. Clima

El clima de Ayacucho es caracterizado como de estepa local, según la clasificación de Köppen, el clima se clasifica como BSk-Estepario frío. La temperatura media anual es 15.4 °C, la precipitación promedio anual 575 mm, la temperatura promedio de 17.5 °C y una humedad relativa promedio de 56%. En general, la atmósfera es seca, produciendo un calentamiento del suelo y del aire, lo que genera baja presión y ascensión de una corriente conectiva que eleva las gotas de agua y las solidifica, produciendo ocasionales granizadas y heladas que afectan las áreas aledañas a la ciudad. Asimismo, en verano se producen torrenciales lluvias que producen una fuerte erosión en tierras de ladera, transportando los sedimentos hacia la zona céntrica de la ciudad, generando daños y molestias.



Ilustración 3.3: Acarreo de sedimentos de la parte alta de la quebrada San Martín.
Fuente: INDECI, 2003.

3.2.2. Geología

El INDECI, mediante un levantamiento geológico de la ciudad de Ayacucho y áreas adyacentes realizado en el 2003, determinaron que el material rocoso son de origen sedimentario y volcánico cuyas edades oscilan entre Terciario superior y Cuaternario reciente. Las unidades litológicas, según el INDECI, que se distribuyen en la zona de estudio son: Tobas volcánicas, areniscas tobáceas, lavas y piroclásticos, diatomitas, piroclásticos terciarios-cuaternarios, depósitos pleistocénicos y los depósitos recientes de origen coluvial, aluvial y fluvial.

3.2.3. Geomorfología

La ciudad de Ayacucho, a nivel regional corresponde a la unidad geomorfológica denominada Penillanura Disectada y a nivel local se identifican unidades que dependen de las características predominantes en cada zona. Según el INDECI, en mayor proporción son los depósitos sedimentarios de la formación Ayacucho y los depósitos aluviales recientes del Cuaternario, mientras en menor proporción se encuentran depósitos volcánicos de la formación Molinoyoc que yace encima de los depósitos sedimentarios de la formación Ayacucho. En la ciudad de Ayacucho y áreas circundantes, se pueden diferenciar la unidad geomorfológica ladera y la unidad de ríos y quebradas.

3.2.4. Uso del suelo

En la zona de estudio se identifican 31 tipos de usos de suelo, las mismas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Usos de suelo en la ciudad de Ayacucho. Fuente: Oficina de Catastro de la Municipalidad provincial de Huamanga, 2015.

N°	Descripción de uso del suelo	Tipos	Área	
			(ha)	(%)
1	Área de expansión urbana	UE	407.17	12.9
2	Comercio central	C - 8	6.52	0.2
3	Comercio distrital	C - 5	99.44	3.1
4	Comercio especializado	CE	9.77	0.3
5	Comercio especializado nocturno 1	CEN - 1	12.09	0.4
6	Comercio especializado nocturno 2	CEN - 2	0.89	0.0
7	Comercio especializado nocturno 3	CEN - 3	0.07	0.0
8	Comercio intensivo	CI	6.87	0.2

9	Industria elemental y complementaria	I - 1	33.42	1.1
10	Industria liviana	I - 2	4.57	0.1
11	Industria mediana	IM	10.22	0.3
12	Reserva agrícola	RAg	51.87	1.6
13	Residencia de baja densidad	R - 1	18.57	0.6
14	Usos especiales	OU	175.15	5.5
15	Usos especiales con fines de salud	OUS	6.72	0.2
16	Usos especiales con fines de transporte	OUT	5.51	0.2
17	Usos especiales con fines educativos	OUE	108.29	3.4
18	Vivienda baja densidad	DB	267.05	8.4
19	Vivienda de alta densidad	DA	92.83	2.9
20	Vivienda de alta densidad reglamento especial	DA - RE	2.41	0.1
21	Vivienda de media densidad	DM	176.87	5.6
22	Vivienda de media densidad reglamento especial	DM - RE	31.04	1.0
23	Vivienda media densidad con restricciones	DMr	127.04	4.0
24	Zona arqueológica	ZAR	102.36	3.2
25	Zona de protección ambiental	ZPA	186.23	5.9
26	Zona de protección de riberas	ZPR	29.98	0.9
27	Zona de reglamentación especial - C.HTCO	ZRE - CH	171.97	5.4
28	Zona de reserva paisajística	ZRP	684.13	21.6
29	Zona recreativa	ZR	31.73	1.0
30	Zona tratamiento especial protección de suelos	ZTE - PS	293.93	9.3
31	Zona turismo recreativo	ZTR	8.82	0.3
	Total		3,163.52	100.0

3.2.5. Densidad poblacional

La densidad poblacional de la ciudad de Ayacucho ha ido variando en el transcurso de los años, producto del crecimiento del distrito de Ayacucho y de los distritos vecinos, que han ido aumentando su densidad concentrándose en los alrededores del centro histórico de la ciudad, originando un crecimiento radiocéntrico.

Según las cifras de la población proyectadas al 2014 por el INEI, a nivel distrital en los últimos 25 años la ciudad de Ayacucho ha experimentado un incremento en la densificación de habitantes por km², siendo estas variaciones mucho más notorias del año 2005 en adelante. Con el crecimiento de la población en todos los distritos aumenta la densidad, principalmente en los distritos San Juan Bautista, Andrés Avelino, Carmen Alto y Jesús Nazareno como se muestra en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2: Evolución de densidad poblacional entre 1981 y 2005.

Año	Ayacucho	Carmen Alto	San Juan Bautista	Jesús Nazareno
1981	557	256	604	0
1993	923	461	1,098	0
2005	1,136	832	1,982	856

Fuente: Censos Nacionales de Población y Vivienda 2005. INEI.

Tabla 3.3: Densidad poblacional por distrito al 2014.

Nombre	Superficie (Km ²)	Población	Densidad poblacional (Hab/Km ²)	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Ayacucho	83.11	91,960	1,106.5	13°09'15"	74°13'22"	2 760
Carmen Alto	17.52	20,661	1,179.0	13°10'20"	74°13'27"	2 800
San Juan Bautista	15.19	48,770	3,210.9	13°09'57"	74°13'20"	2 734
Jesús Nazareno	16.12	17,663	1,095.6	13°09'11"	74°12'41"	2 734
Andrés Avelino Cáceres Dorregaray	9.28	21,242	2,289.0	13°09'42"	74°12'38"	2 734
Total	141.22	200,296	1,776.2			

Fuente: Población total proyectada al 30/06/2014, INEI.

3.3. MATERIALES Y EQUIPOS

Básicamente se ha utilizado un GPS navegador y un termómetro para medir la temperatura del suelo, recogiendo información de dicha variable en 39 puntos distribuidos al azar en toda el área urbana de la ciudad de Ayacucho. Cabe indicar que de 39 puntos, 9 de ellos fueron para validar el modelo de interpolación de la temperatura superficial y el resto se tomaron para elaborar el mapa de TS. En la ilustración 3.4, los sitios de muestreo se señalan con puntos de color rojo.

Se trabajó con los programa ILWIS 3.3 Academic, TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System (antes Idrisi), ArcGis 10.5, Envi 5.5, Erdas 2016, Global Mapper 19, QGIS 2.8.1, Relief Visualization Toolbox 1.3, SkyHelios y además el programa SPSS 22 para el análisis estadístico de datos discretos.

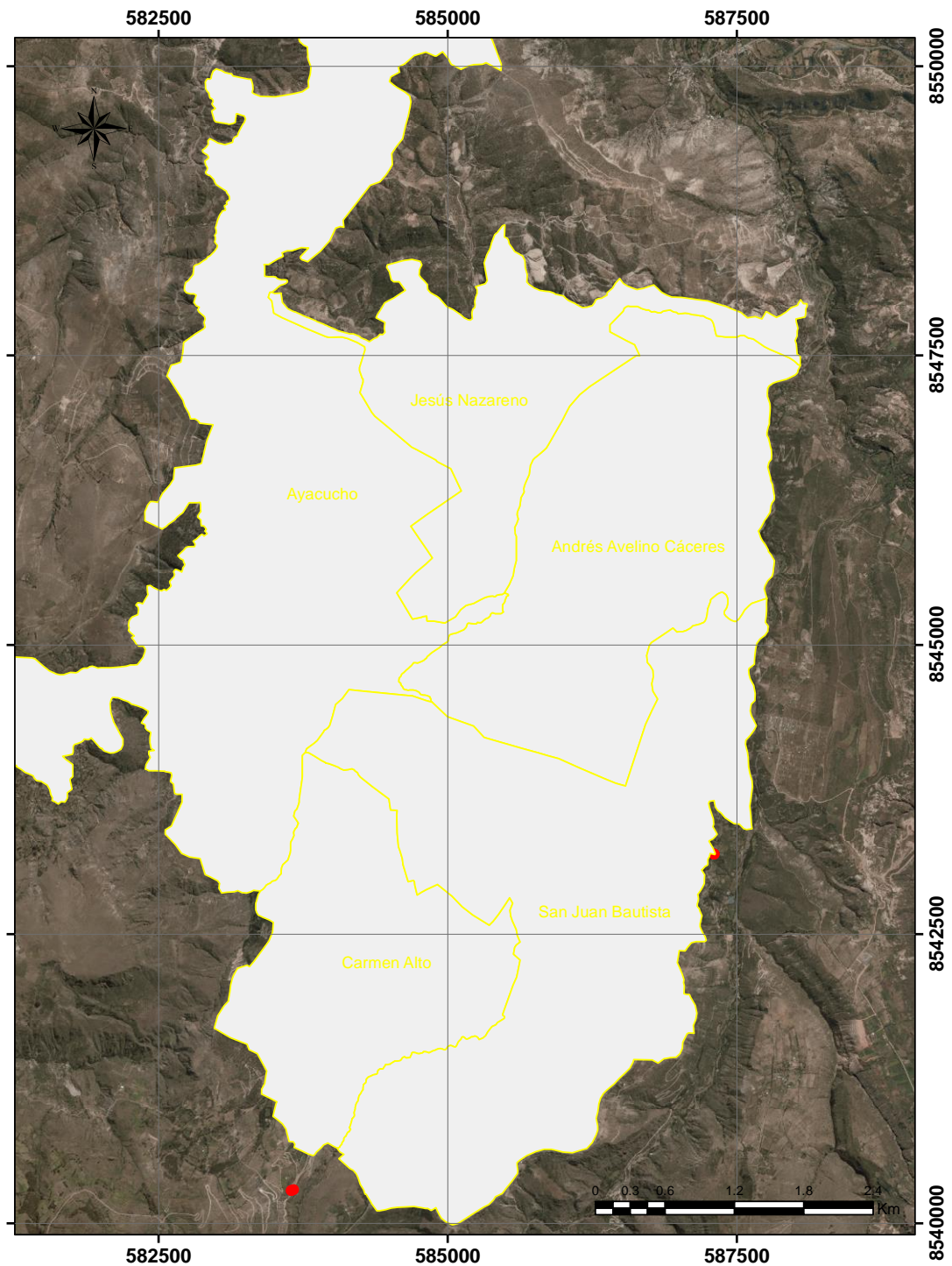


Ilustración 3.4: Ubicación de los puntos de muestreo para el registro de Ts.

3.4. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El estudio es del tipo exploratorio-descriptivo y no experimental, fundamentado en la interpretación y análisis de datos climáticos provenientes de estaciones

meteorológicas, parámetros urbanos y datos de imágenes satelitales. El nivel de investigación es relacional y a la vez explicativo.

3.5. UNIDAD DE ANÁLISIS Y MUESTRA

La unidad básica de análisis corresponde al área urbana de la ciudad de Ayacucho, cuya extensión es 3,163.52 hectáreas, sobre esta área se tomaron muestras de temperatura de suelo, se obtuvieron datos climáticos e imágenes de satélite. A partir de estos datos se procesaron la información con el que se prepararon mapas temáticos para el análisis multivariado.

3.6. DISEÑO Y ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

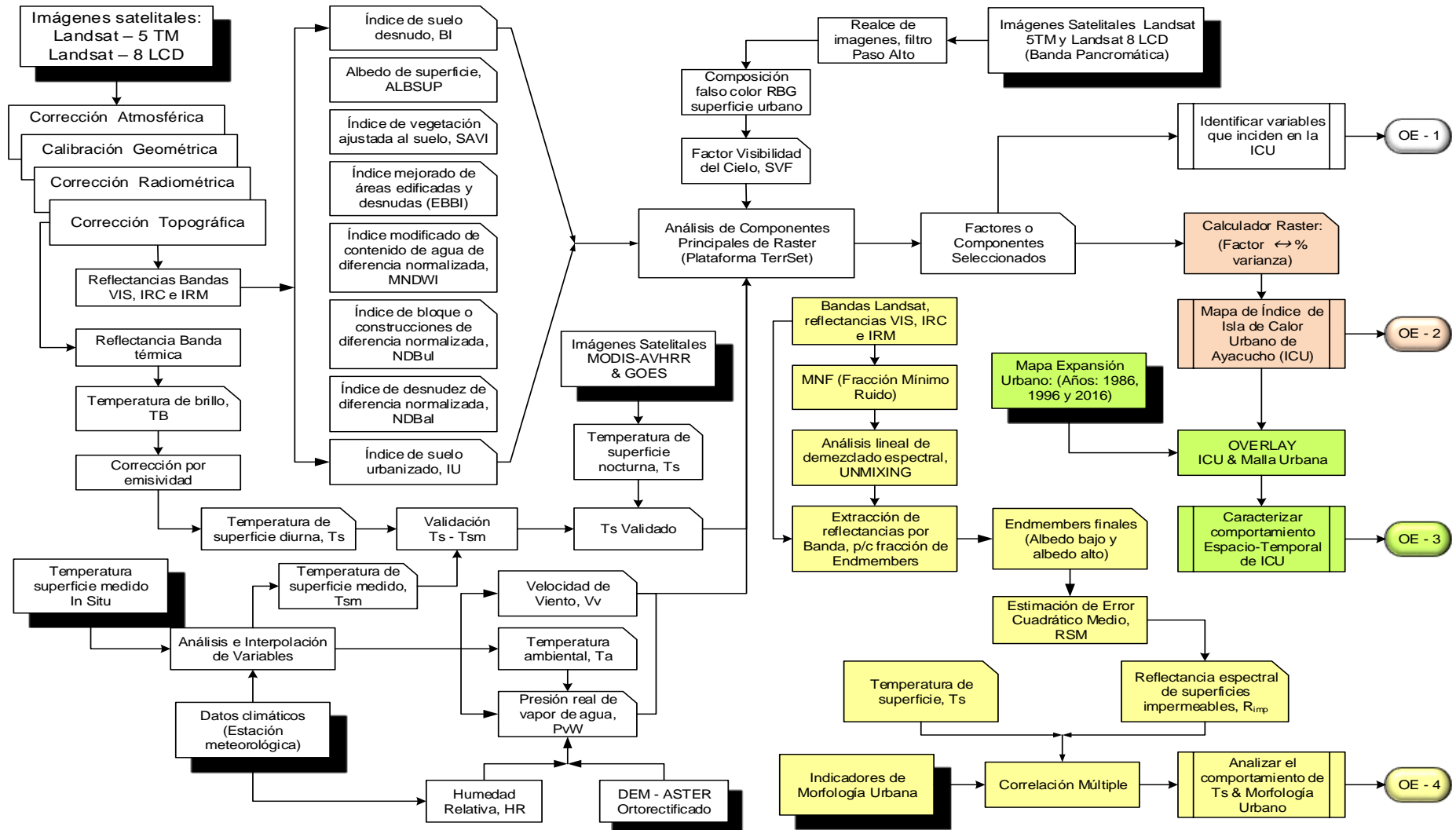
La investigación se desarrolló en dos fases, la primera fase constituye la toma de datos *in situ* de temperatura del suelo, mientras la segunda fase ha sido la aplicación de herramientas de la Geomática y técnicas de geoestadística en la preparación de datos para determinar la existencia o ausencia del fenómeno de ICU, y así como para analizar las dinámicas o el comportamiento de dicho fenómeno en la ciudad de Ayacucho para el periodo de estudio.

En general se utilizaron métodos inductivos y deductivos sobre la base de conceptos epistemológicos, mediante el cual se analizan las relaciones teóricas que intervienen en el problema tratado, metodología ampliamente aplicado en el campo de la teledetección (Chuvieco, 2002).

Para estimar el índice de isla de calor urbana, en un área medianamente extensa y con pocos datos meteorológicos, el estudio se basa en la combinación de datos radiométricos de imágenes satelitales del espectro electromagnético en el rango visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo térmico; integrando al análisis parámetros urbanos asociados al problema.

El desarrollo del presente trabajo se basa en los modelos de Isla de Calor Urbana propuestos por Wu y Murray (2003), Zhang et al. (2008), Ma et al. (2010), Bonafoni et al. (2016) y Ali et al. (2017). Además para obtener las demás variables de entrada requeridas en la estimación del índice de ICU se utilizan otros modelos que se detallan más adelante. El procedimiento metodológico desarrollado se muestra en los flujogramas 3.5 y 3.6.

Ilustración 3.5: Esquema metodológico desarrollado en el análisis espaciotemporal de ICU. Fuente: Elaboración propia.



Para la interpolación de datos tomados in-situ y de la información climática provenientes de estaciones meteorológicas se ha seguido el siguiente procedimiento.

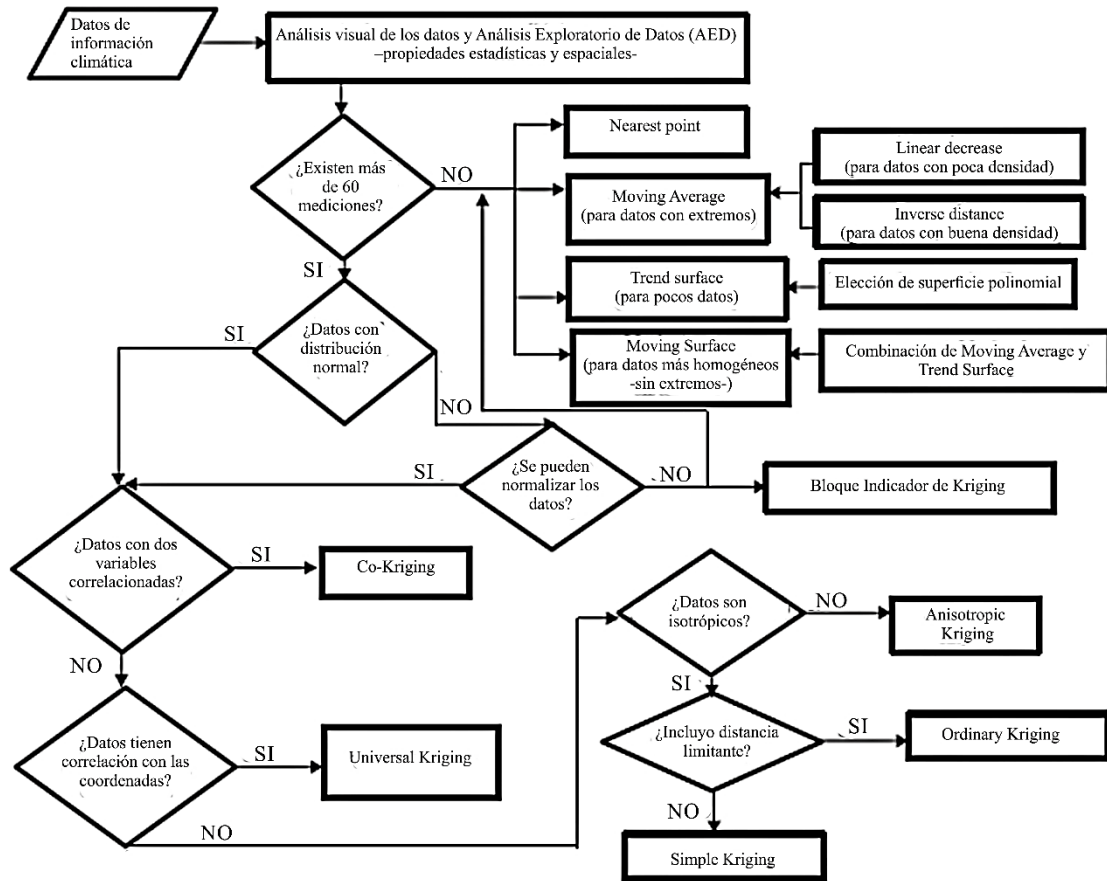


Ilustración 3.6: Flujograma de interpolación. Fuente: Adaptado de Moreno, 2012.

A continuación se detalla el procedimiento adoptado para este trabajo, según lo indicado en el esquema metodológico.

3.6.1. Procesamiento de imágenes de satélite

3.6.1.1. Selección de imágenes de satélite

Se ha seleccionado imágenes de los sensores Thematic Mapper (mapeador temático) y de Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) a bordo de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 8 LCMD (Landsat Data Continuity Misión), obtenidas en forma gratuita desde la página web <http://glovis.usgs.gov/> del United States Geological Survey (USGS). El Landsat 5 opera en siete bandas espectrales las mismas que están diseñadas especialmente para el seguimiento de la vegetación, a excepción de la banda 7 que sirve para aplicaciones

geológicas. El mapeador temático tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS; asimismo, mejor resolución espacial, ya que el tamaño del píxel en todas las bandas, excepto la 6, es de 28,5 metros, aproximadamente, y una resolución temporal de 16 días. La banda 6 tiene un píxel de 120 metros en el terreno y cada imagen cubre 185x185 kilómetros. Las bandas del Landsat 5TM y el ancho son los siguientes:

- Banda 1: 0.45 a 0.52 μm - Azul, útil para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintas cubiertas boscosas.
- Banda 2: 0.52 a 0.60 μm - Verde, especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana en base al pico de reflectancia o radiancia.
- Banda 3: 0.63 a 0.69 μm - Rojo, es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal.
- Banda 4 (NIR): 0.76 a 0.90 μm - infrarrojo cercano, útil para determinar el contenido de biomasa.
- Banda 5 (SWIR₁): 1.55 a 1.75 μm - infrarrojo medio, indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo.
- Banda 7 (SWIR₂): 2.08 -2.35 μm - infrarrojo medio, indicado para aplicaciones geológicas y urbanas.

El Landsat 8-LC8 es un satélite más completo respecto a su antecesor Landsat-7, con funciones mejoradas para el monitoreo de la calidad del agua y nubes atmosféricas altas, el satélite tiene dos sensores: Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un sensor de Infrarrojos Térmico (TIRS).

- OLI está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. La resolución espacial oscila entre los 15m y los 30m.
- TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, la B10 y B11, las cuales detectan infrarrojos térmicos, imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

Tabla 3.4: Características de bandas del Landsat 8-LCDM.

Sensor Landsat 8	Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
OLI	Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
	Band 2 - Blue	0.452 - 0.512	30
	Band 3 - Green	0.533 - 0.590	30
	Band 4 - Red	0.636 - 0.673	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
	Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
	Band 8 - Panchromatic	0.503 - 0.676	15
	Band 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
TIRS	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

* Banda TIRS adquirida con 100m de resolución, resampleados a 30m para la distribución de los productos.

Se seleccionaron escenas del satélite Landsat-5 para los años 1986, 1996 y 2006, mientras tanto, para el 2016 las imágenes corresponden al Landsat 8-LCMD; siendo mayo, junio, julio y agosto los meses considerados para el análisis espacio-temporal, por corresponder a los meses secos del año y en los cuales el factor térmico en la ciudad se constituye en un problema para la salud de la población.

Desde el aspecto operativo, la obtención de imágenes se adecua a la disponibilidad de data gratuita; siendo el intervalo de tiempo del estudio cada 10 años. El área urbana de la ciudad de Ayacucho abarca escenas que corresponden al Path 05 (órbita aproximada del satélite) y Row 69 (centro nominal de la escena o imagen). En la Tabla 3.8 se indica las fechas a las cuales corresponden las imágenes empleadas en este trabajo.

Tabla 3.5: Fechas de adquisición de imágenes Landsat 5-TM y Landsat 8-LCMD.

Año	1986	1996	2006	2016
Fecha	1986-07-26	1996-05-18	2006-06-15	2016-08-29

3.6.1.2. Tratamiento de imágenes de satélite

Para el Landsat 5, los datos de radiación están almacenados en formato 8-bit, es decir, un número natural entre 0 y 255, mientras los datos del Landsat 8 están en formato de 16 bits. Estos números se denominan valor digital (DN). Para estudios multitemporales, en el que se deben comparar varias imágenes entre sí, el valor digital no es un buen patrón de medición de los cambios que se producen en la superficie terrestre a través del tiempo. El DN depende no sólo de las condiciones del suelo y de las plantas, sino también de la calibración del sensor, el ángulo de elevación solar, el ángulo de visión del sensor, la distancia Tierra-Sol, y las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. Por tanto, es necesario convertir el DN en un valor que tenga en cuenta la calibración del sensor y sea independiente de las condiciones de insolación y atmosféricas. Ese valor es la reflectividad de la superficie, que se ha convertido en la medida básica de los píxeles en las imágenes satelitales requerida por la mayoría de algoritmos y modelos de teledetección (Moran et al., 2001). El proceso ha sido el siguiente.

a) Corrección atmosférica

La radiación solar recorre dos veces el espesor de la atmósfera hasta llegar al sensor del satélite. El vapor de agua y los aerosoles presentes en la atmósfera absorben y dispersan parte de esa radiación solar. La radiación que llega al sensor será, por tanto, la suma de la radiancia aportada por la dispersión de la atmósfera y la radiancia reflejada por la superficie terrestre, estando esta última atenuada por el factor de transmisividad de la atmósfera. Mediante esta corrección se pasa de reflectividad aparente (la que mide el sensor) a reflectividad de la superficie terrestre.

Para la corrección de los efectos de la composición de la atmósfera en los niveles digitales de las imágenes se ha utilizado el método propuesto por Chávez (1996), denominado corrección del histograma por sus valores mínimos (Histogram Minimum Method, HMM), que consiste en restar del histograma de cada banda de

la imagen su valor mínimo. Se acepta que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción (por ejemplo, el agua en la banda del azul) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a 0.

b) Corrección geométrica

Para poder comparar las imágenes entre sí debe existir una correspondencia geométrica entre ellas y se puedan integrar con otro tipo de información geográfica. El modelo elegido para modificar la geometría de las imágenes de satélite, a partir de los puntos de control (puntos con coordenadas conocidas distribuidos en una imagen y que permiten enlazar posiciones comunes a la cartografía básica fiable) fue de tipo polinomial cuadrático, y para el remuestreo de valores de los píxeles se eligió el método del vecino más próximo (Nearest neighbour). Este método de remuestreo es la solución más rápida la que supone menor transformación de los ND originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen (contornos, carreteras y otros accidentes naturales o artificiales), que pueden aparecer en la corregida como líneas quebradas; sin embargo, su uso es común en la corrección geométrica de imágenes satelitales.

La georreferenciación de las imágenes se realizó buscando puntos comunes entre ésta y el archivo vectorial correspondiente a la red hidrográfica de Ayacucho en proyección U.T.M. (proveniente del Instituto Geográfico Militar del Perú-IGM). Todo ello se realizó con el programa TerrSet (Geospatial Monitoring and Modeling System, antes Idrisi). Un ejemplo de la distribución de los puntos de control en una imagen se muestra en la Ilustración 3.7.

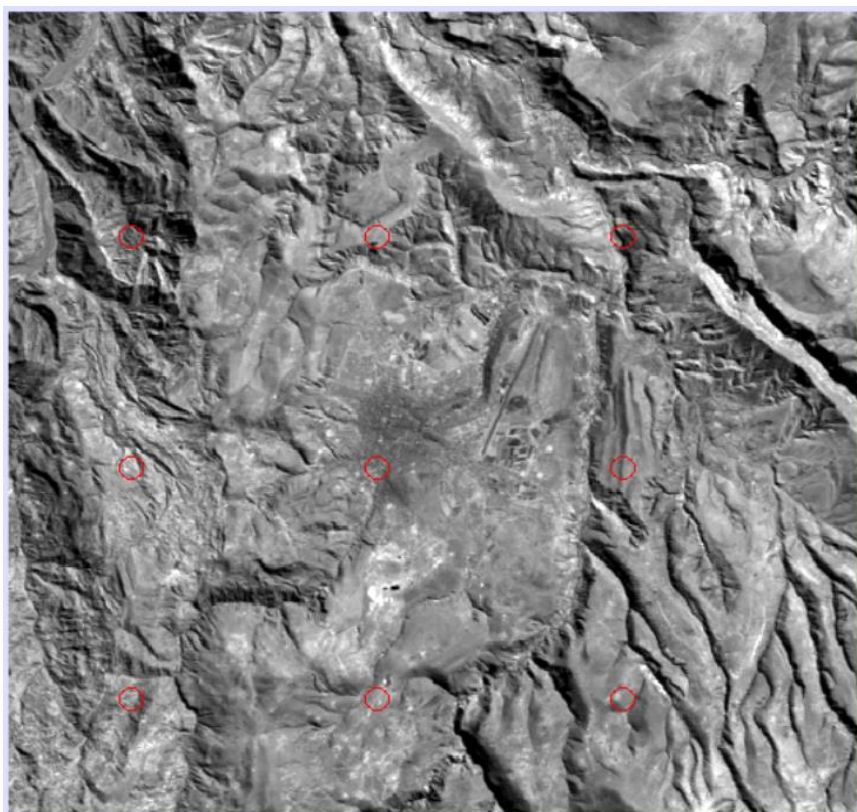


Ilustración 3.7: Puntos de control sobre la Banda 4 del Landsat de 26.jul.1986.

El parámetro más importante que calcula el programa TerrSet es el RMS (Error medio cuadrático), pues indica la precisión de los puntos escogidos. En este caso el RMS está calculado en metros, por lo que se puede estimar que el error que se produjo promedia los 4.87 metros. Esta es una cifra aceptable considerando que se trabajó con una imagen en que el tamaño del píxel aproximadamente es de 30 metros. La información utilizada en la georreferenciación y, el valor del RMS resultante se muestra en la Tabla 3.6

Tabla 3.6: Información utilizada en la georreferenciación de las imágenes.

Especificaciones	Imágenes Landsat / Año de análisis			
	1986	1996	2006	2016
Vectorial referencia	Red hidrográfica de Ayacucho			
Escala nominal	1:50,000			
Tipo corrección	Polinomial cuadrática			
Remuestreo	Vecino más cercano (<i>Nearest Neighbor</i>)			
Proyección	UTM			

Huso	18
Hemisferio	S
Datum	WGS 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984)
RMS (píxel)	4.87

c) Calibración radiométrica

Mediante esta operación se convierte el valor digital (DN) de una imagen de satélite en valores de radiancia medida por el sensor (la señal recibida por los sensores se codifica en diferentes valores de DN de acuerdo a la reflexión de la radiación electromagnética de las cubiertas). La conversión de los DN a reflectividades se realiza en dos fases: primero se pasa los DN a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración. La radiancia es ya una magnitud física, con unidades ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$). Posteriormente, el valor de radiancia se transforma en reflectividad aparente teniendo en cuenta la irradiancia solar en el punto y la fecha de adquisición de la imagen.

d) Corrección topográfica

El término corrección o normalización topográfica se refiere a la compensación de las diferencias de iluminación solar que se producen entre zonas, debido a la forma irregular del terreno. Este efecto que tienen la pendiente y la orientación del terreno sobre la iluminación del mismo, causa una fuerte variación en la respuesta espectral de tipos de cubierta similares: cubiertas en zonas sombreadas muestran una reflectividad menor de la esperada, mientras que en zonas soleadas el efecto es contrario. Por tanto, el proceso de normalización topográfica es crítico en las áreas de terreno abrupto o montañoso, siendo necesario la corrección topográfica, como paso previo al estudio de las cubiertas del suelo, adquiriendo mayor importancia aún en estudios multitemporales, en los que las condiciones de iluminación son distintas en cada imagen considerada.

La mayor dificultad en la aplicación de correcciones topográficas es la ausencia de modelos que sean de aceptación común. En la literatura se pueden encontrar una amplia variedad de métodos sin que haya un consenso sobre la aplicación de cualquiera de ellos universalmente. Otra dificultad es la disponibilidad de un modelo digital de elevaciones preciso para la zona en estudio, lo cual supone una gran limitación en los estudios de zonas poco desarrolladas (Riaño et al., 2003).

Los métodos existentes para corregir el efecto de la topografía se pueden agrupar en dos categorías: lambertianos y no lambertianos. Actualmente existe un amplio rango de algoritmos para la corrección topográfica, de los cuales, en este trabajo se aplica el modelo de iluminación. Según Eastman (2004), los pasos en TerrSet han sido los siguientes:

- Calcular el promedio de banda de la imagen para corregir.
- Con un Modelo de Elevación Digital (DEM) se crea un mapa de sombreado analítico, para el trabajo se utilizará una imagen ASTER DEM que será obtenido en forma gratuita desde la página web <http://earthdata.nasa.gov/> de la Agencia Estadounidense del Espacio y la Aeronáutica (NASA).
- Calcular la relación lineal entre el mapa de sombreado y la imagen a corregir. Se usa la imagen como la variable dependiente y el sombreado como la variable independiente.
- Aplicar la compensación y la ganancia en el mapa de sombreado.
- El resultado anterior se resta de la imagen original y luego se agrega el promedio calculado en el primer paso.

El resultado visual de la corrección topográfica se puede observar en la Ilustración 3.8. En la imagen sin corregir se pueden observar zonas sombreadas y otras más luminosas. En la imagen corregida se distinguen los diferentes tipos de cubierta, pero resultan menos apreciables los desniveles del terreno, lo que indica que la reflectividad de la superficie depende, en una mínima parte, de su nivel de iluminación; pero depende en mayor proporción, de las características de la cubierta del suelo. En la imagen corregida, los píxeles que no reciben radiación solar directa (píxeles totalmente en sombra) tienen un valor nulo de reflectividad para todas las bandas.

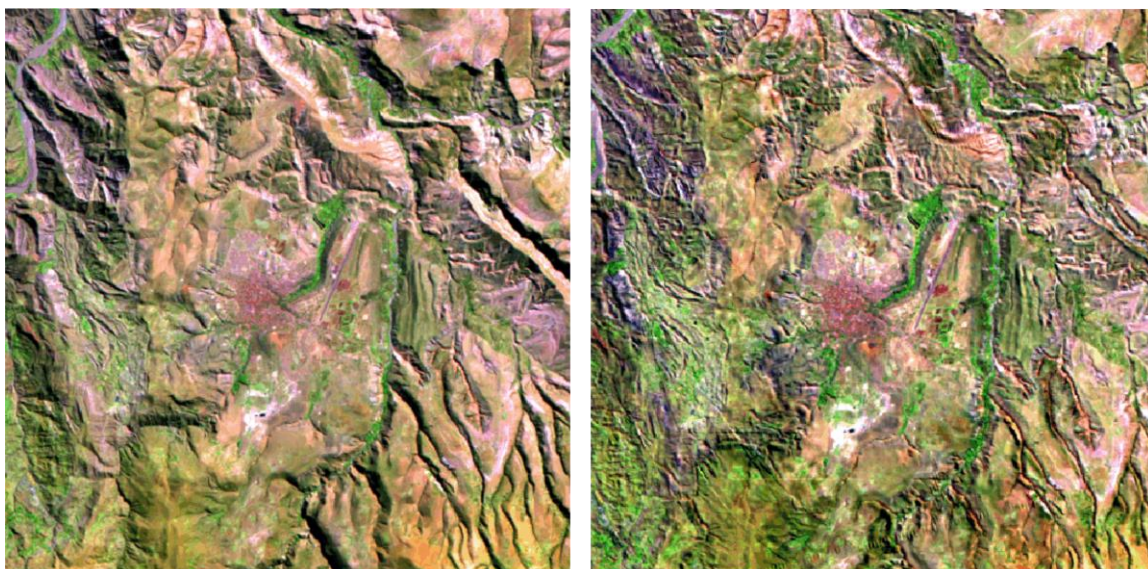


Ilustración 3.8: Detalle de la imagen Landsat, en falso color 741, de julio 1986 antes (izquierda) y después de la corrección topográfica (derecha).

3.6.2. Información meteorológica

Los datos serán obtenidos de la Red Hidrometeorológica del Gobierno Regional de Ayacucho y del Servicio Meteorológico de la Universidad Nacional de “San Cristóbal de Huamanga”. Los datos que se utilizan en este estudio son: Temperatura mínima, temperatura máxima, Temperatura media, Humedad relativa, Velocidad de viento y Presión atmosférica.

Tabla 3.7: Lista de las estaciones meteorológicas y datos utilizados en el estudio.

Estación	Provincia	Distrito	Estado	Latitud	Longitud
San Pedro De Quicato	Huamanga	Acocro	Func	13°17'44.2"	74°01'33.9"
Huamanga-UNSCH	Huamanga	Ayacucho	Func	13°08'51"	74°13'06"
Huamanga	Huamanga	Ayacucho	No Func	13°09'1"	74°13'1"
Bella Vista Chiara	Huamanga	Chiara	Func	13°16'7.6"	74°12'19.8"
Allpachaca	Huamanga	Chiara	No Func	13°23'1"	74°16'1"
Sachabamba	Huamanga	Chiara	Func	13°27'38.2"	74°06'2.6"
Chungui	La Mar	Chungui	No Func	13°13'1"	73°37'1"

Choccoro	Cangallo	Chuschi	Func	13°24'48.5"	74°28'23.1"
Chuschi	Cangallo	Chuschi	No Func	13°35'1"	74°21'1"
Cuchoquesera	Cangallo	Chuschi	Func	13°25'54.6"	74°20'40.3"
Huanta	Huanta	Huanta	Func	12°56'55"	74°14'13"
Pampa Cangallo	Cangallo	Los Morochucos	Func	13°33'19.4"	74°11'52.3"
Wayllapampa	Huamanga	Pacaycasa	Func	13°04'3"	74°13'13"
Apacheta	Cangallo	Paras	Func	13°20'51.2"	74°38'44.1"
La Quinoa	Huamanga	Quinoa	Func	13°02'2"	74°08'7"
San Miguel	La Mar	San Miguel	No Func	13°01'1"	73°59'1"
Hacienda Cochas	La Mar	San Miguel	No Func	13°02'1"	73°53'1"
San Pedro De Cachi	Huamanga	Santiago De Pischa	No Func	13°03'2"	74°21'20"
Pucaloma	Huamanga	Socos	Func	13°12'21.2"	74°17'75.4"
Putaca	Huamanga	Vinchos	Func	13°23'39"	74°21'13.1"
Vischongo	Vilcas Huaman	Vischongo	No Func	13°35'1"	74°00'1"

A partir de estos datos, se obtienen superficies continuas de variables meteorológicas seleccionadas a la misma resolución espacial de las imágenes Landsat, con el objetivo de obtener una serie temporal climática en cada uno de los píxeles y así poder relacionar con las variables obtenidas mediante teledetección. En la interpolación se utilizaron diferentes métodos según el protocolo de interpolación que se muestra en la Ilustración 3.6.

3.6.3. Cálculo de indicadores biofísicos y parámetros urbanos

3.6.3.1. Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)

El SAVI propuesto por Huete (1988) ha sido creado para reducir las alteraciones del valor del NDVI cuando se aplica en zonas áridas y zonas montañosas, el objetivo es corregir el efecto del suelo en el valor del índice ya que el mismo valor de NDVI puede corresponder a cubiertas vigorosas pero poco densas, o a cubiertas densas pero con poco vigor. El Índice SAVI se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{SAVI} = \frac{(\text{IRC} - \text{R})}{(\text{IRC} + \text{R} + \text{L})} (1 + \text{L})$$

Para el cálculo del SAVI se considera 0.5 como valor de L (factor de ajuste al suelo), que es el recomendado para densidades intermedias de vegetación. El índice varía de -1 a +1 y el resultado es reescalado para evitar valores negativos.

3.6.3.2. Índice modificado de agua de diferencia normalizada (MNDWI)

Utilizado por primera vez por Hardisky et al. (1983), permite cuantificar la cantidad de agua existente en la cubierta vegetal, así como detecta la humedad del suelo. Este índice ha sido creado debido a la poca efectividad del índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) para separar territorios artificiales de agua, por ello Xu (2006) propuso modificar el NDWI reemplazando la banda del Infrarrojo Cercano (IRC, B4) por la banda del Infrarrojo Medio (SWIR₂). Los valores de este índice varían entre -1 y 1, donde los valores superiores a cero corresponden a cuerpos de agua y se expresa como:

$$\text{NDWI} = (\text{Verde} - \text{SWIR}_2) / (\text{Verde} + \text{SWIR}_2)$$

Gao (1996) establece un valor umbral de NDWI para la vegetación húmeda de 0.064 y Chen et al., (2006) plantea un valor mínimo apropiado de 0.05, por lo tanto, valores mayores indican un nivel más alto de humedad en las cubiertas vegetales y también la saturación de humedad del suelo, en este sentido, el valor umbral de MNDWI se definió en 0.11 para garantizar la selección de cubiertas con buena condición de humedad.

3.6.3.3. Índice de suelo desnudo (BI)

El índice BI, propuesto Rikimaru y Miyatake (1997) y luego por Zha et al. 2003, Zhao y Chen, 2005; se utilizaron para determinar superficies desnudas en áreas urbanas de cubiertas heterogéneas, sus valores varían entre -1 y 1 y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$BI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$$

El índice BI se complementa con el índice de vegetación, este último no es muy confiable en situaciones donde la vegetación cubre menos de la mitad del área en estudio. Con la inclusión del índice BI, la estimación de la vegetación se hace más confiable por la alta reciprocidad entre las condiciones del suelo desnudo y el estado de la vegetación, por ello el índice IB no es redundante con respecto a los demás índices utilizados en este trabajo.

3.6.3.4. Albedo de superficie terrestre

El albedo de superficie se estimó a partir del cálculo del albedo planetario (α_{toa}) para cada banda. Según la propuesta de Bastiaanssen (2000), se obtiene mediante una combinación lineal entre las reflectancias monocromáticas de las bandas y el coeficiente de regresión, la expresión es el siguiente:

$$\alpha_{toa} = ((0.356*B2) + (0.13*B4) + (0.373*B5) + (0.085*B6) + (0.072*B7) - 0.0018) / 1.016$$

Para el cálculo del albedo de superficie o albedo ajustado por la transmitancia atmosférica se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_{sp} = \alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance} / T_{sw}^2$$

$$T_{sw} = 0.75 + (2 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{altitud}$$

Donde, α_{sp} es el albedo de superficie, $\alpha_{path_radiance}$ es la porción de radiancia solar reflejada por la atmósfera, valor igual a 0.03 según la propuesta de Bastiaanssen (2000) y T_{sw} es la transmitancia atmosférica o la fracción de radiación solar incidente, que es transmitida por la atmósfera con su efecto de absorción y reflexión (Allen et al., 2002). El valor del albedo varía entre 0 y 1, las superficies secas son de colores claros porque reflejan más con respecto a las superficies húmedas y áreas urbanas que absorben la radiación solar.

3.6.3.5. Estimación de temperatura de superficie (TS)

Para obtener la temperatura de superficie diurna, la radiancia espectral a nivel de sensor (banda térmica), se transforman a temperatura de brillo del satélite usando la ecuación desarrollada por Chander y Markham (2003), y se expresa como:

$$T_{sen} = [K_2 / \ln (K_1 / L_\lambda + 1)]$$

Donde:

T_{sen} = temperatura de brillo en grados Kelvin, para una radiancia L ,

K_1 = constante de calibración 1 en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,

K_2 = constante de calibración 2 en grados Kelvin,

L_λ = radiancia espectral del sensor.

La temperatura de brillo está referida como la de un cuerpo negro, por tanto, es necesario introducir la emisividad de la superficie de la tierra, considerando los tipos de uso para obtener

la temperatura cinética de superficie. Teniendo como dato la temperatura de brillo, la temperatura de superficie corregida por emisividad puede ser calculada por la ley de Stefan Boltzmann (Gupta, 1991). Esta conversión se realiza mediante la ecuación propuesta por Jiménez y Sobrino (2009):

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\epsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$$

Donde:

L_{sen} = radiancia termal a nivel del sensor,

T_s = temperatura de superficie terrestre (K),

T_{sen} = temperatura de brillo (K),

b_λ = 1256k para Landsat-5, 1324k y 1199k para las bandas 10 y 11 de Landsat-8.

ψ_1, ψ_2, ψ_3 = Funciones atmosféricas,

W : Vapor de agua estimado con datos de estaciones meteorológicas,

Los parámetros γ, δ se determinan con las ecuaciones:

$$\gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad \delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma}$$

El cálculo de las funciones atmosféricas para la corrección por vapor de agua a través de las siguientes expresiones:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \quad \psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}; \quad \psi_3 = L_d$$

Las funciones atmosféricas y el contenido de vapor de agua ha sido operacionalizado en una matriz de segundo orden:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix}$$

En donde, los valores de C son los siguientes:

$$C = \begin{bmatrix} 0.04019 & 0.02916 & 1.01523 \\ -0.38333 & -1.50294 & 0.20324 \\ 0.00918 & 1.36072 & -0.27514 \end{bmatrix}$$

El cálculo de la presión de vapor de agua saturada (e_w^*) se realiza a partir de temperatura de aire seco (T) y la presión de aire (P), datos derivados de estaciones meteorológicas.

$$e_w^* = (1.0007 + 3.46 * 10^{-6} P) \times (6.1121) \cdot \exp\left(\frac{17.502T}{240.97 + T}\right)$$

La presión de vapor se calcula con: P_0 la presión atmosférica a nivel del mar (101.3 Kpa) y Z es la altitud en m.s.n.m., la ecuación es el siguiente:

$$P = P_0 \exp\left(\frac{z}{8000}\right)$$

Finalmente, la presión real de vapor de agua (P_{wr}) es calculada utilizando datos de humedad relativa (RH), luego convertido de Hpa a gr/cm^2 multiplicando por el factor 0.098.

$$P_{wr} = e_w^* \times \left(\frac{RH}{100}\right) \times 0.098$$

Para el cálculo de emisividad de coberturas se utiliza la ecuación propuesta por Jiménez y Sobrino (2003), cuya expresión para la condición de $0.2 \leq NDVI \leq 0.5$ es el siguiente:

$$E = f_v \varepsilon_v + \varepsilon_s (1 - f_v) + C_i$$

Dónde:

f_v = fracción de vegetación derivada del NDVI;

ε_v y ε_s = emisividades de las cubiertas de vegetación y del suelo. Para estos datos, los valores que se adoptan son 0.985 y 0.960, respectivamente.

C_i = efecto de cavidad debido a la rugosidad de la superficie.

$$C_i = ((1 - \varepsilon_s) \varepsilon_v) * G_f * (1 - f_v) + F_v$$

G_f es el factor geométrico que depende de la configuración de la superficie y cuyo rango varía entre 0 y 1, por lo general el valor recomendado es igual a 0.55.

El pixel es considerado como suelo desnudo cuando $F_v = 0$, cuando el NDVI < 0.2. En esta condición, la emisividad se estima mediante una correlación de reflectancia del infrarrojo cercano en la banda roja (ρ_{red}), la expresión es el siguiente:

$$E = a + b \rho_{red} \quad (F_v = 0)$$

Para obtener la fracción vegetal se utilizó la relación lineal propuesta por Wittich y Hansing (1995), utilizadas también con resultados aceptables por otros autores (Choudhury et al., 1994; Qi et al., 2000, Ramsey et al., 2004). La ecuación de dicha transformación se expresa como:

$$f_v = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_{100} - NDVI_0)$$

Dónde:

f_v = fracción de cobertura vegetal del suelo,

$NDVI_0$ = índice correspondiente a suelo desnudo,

$NDVI_{100}$ = índice correspondiente a una superficie completamente vegetada.

El cálculo del porcentaje de vegetación del suelo está en función del NDVI, el cual ha sido calculado utilizando la ecuación propuesta por Rouse et al. (1974) y se expresa como:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R})$$

Para la obtención de temperaturas de superficie nocturna se utilizaron imágenes del satélite MODIS-AVHRR y del satélite GOES. Asimismo, las temperaturas de superficie (diurnas y nocturnas) estimadas con datos de imágenes satelitales han sido validadas con mediciones en campo mediante una correlación lineal.

3.6.4. Cálculo de parámetros urbanos

3.6.4.1. Índice de edificaciones de diferencia normalizada (NDBul)

El índice de bloque o construcciones de diferencia normalizada, propuesto por Roger y Kearney (2004), se utiliza para destacar las áreas construidas y el suelo desnudo, dado a que estas superficies son más reflectivas en el SWIR₁) que en el NIR. El índice se ha determinado mediante la ecuación:

$$\text{NDBul} = (\text{SWIR}_1 - \text{NIR})/(\text{SWIR}_1 + \text{NIR})$$

El índice NDBul varía entre -1.0 a 1.0, los valores menores a cero resalta las cubiertas vegetales, mientras los valores mayores a cero son indicadores de cubiertas edificadas y superficies desnudas (Zha et al., 2003; Chen et al., 2006, y Santana et al., 2010); por lo tanto, se definió en 0.1 como valor umbral mínimo para la selección de cubiertas edificadas.

3.6.4.2. Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada (NDBal)

El índice NDBal propuesto por Chen et al. (2006) se utilizaron para determinar superficie impermeable y suelo desnudo en áreas urbanas, sus valores varían entre -1 y 1 y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$NDBal = \frac{(B5 - B6)}{(B5 + B6)}$$

3.6.4.3. Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas (EBBI)

EBBI es un nuevo índice para el mapeo de áreas edificadas y desnudas, propuesto por As-syakur et al., 2012. Para un mayor nivel de contraste, en las operaciones matemáticas se introduce una función raíz, agrupando pixeles que contrastan objetos idénticos en función a los niveles de reflectancia. Para obtener un valor de índice de -1 a 1, el factor multiplicado se divide por diez, la fórmula es el siguiente:

$$EBBI = (B5 - B4) / 10\sqrt{B5 + B6}$$

3.6.4.4. Índice de suelo urbanizado (UI)

El índice IU ha sido calculado con la propuesta desarrollada por Kawamura et al. 1996, cuya expresión es la siguiente:

$$UI = \frac{(SWIR2 - NIR)}{(SWIR2 + NIR)}$$

3.6.4.5. Factor de visión del cielo (Svf)

Se refiere a la porción de cielo en la cual el espacio público se presenta abierto u obstruido, está relacionado con la formación del llamado cañón urbano, que tiene que ver con el ingreso de radiación directa y con la ventilación de la calle. Para determinar este parámetro el procedimiento ha sido el siguiente:

- Realce de imágenes satelitales con el filtro tipo paso alto de 7x7 pixeles, bandas: SWIR₂, SWIR₁ y NIR.

- Composición de imágenes realizadas en Falso Color RGB para zonas urbanas: SWIR₂, SWIR₁, NIR.
- Aplicación del modelo para el cálculo de factores climáticos a micro escala con los algoritmos: Relief Visualization Toolbox 1.3 y SkyHelios.

3.6.5. Estimación del Índice de Isla de Calor Urbano

La ciencia estadística ha desarrollado un conjunto de técnicas para manejar conjuntos de variables correlacionadas entre sí, la más utilizada en teledetección de estas técnicas de análisis multivariable es el de Análisis de Componentes Principales (ACP). La justificación teórica del mismo es que, a partir del conjunto de variables puede obtenerse un conjunto de componentes, como combinación lineal de las variables. Estas componentes se caracterizan por: a) Contienen la misma información que las variables originales; b) Se conoce el porcentaje de la varianza original que absorbe cada componente; c) Los componentes se ordenan de acuerdo con el porcentaje de varianza absorbida.

En este sentido, las variables de datos teledetectados y de estaciones meteorológicas han sido procesados con el programa TerrSet, la extracción de los componentes se realizó considerando la matriz de correlación, y por el método de regresión, con autovalor (eigenvalues) mayor a 1 para retener al menos una de las variables de entrada. Para estimar el índice de islas de calor urbano se realizaron los siguientes pasos:

- Se procesaron 12 variables de indicadores biofísicos y parámetros urbanos.
- Se aplica el APC con el TerrSet, el análisis ha sido del tipo Forward T-Mode y la matriz de tipo Covarianza por tratarse de datos no estandarizados.
- Se seleccionaron los componentes con mayores varianzas y según su peso se determinaron los factores sintéticos. En general se ha determinaron 5 factores para cada periodo del estudio.

Mediante este procedimiento, en este trabajo el APC facilita: 1) Identificar las posibles variables latentes, o no observadas que generan los datos; 2) Permitted

transformar las variables originales, en general correladas, en nuevas variables incorreladas y con información no redundantes.

3.6.6. Análisis espacio temporal de ICU y Ts

El análisis de la dinámica espacio temporal de Ts en el área urbana y periurbana se realizó analizando la información existente sobre la configuración urbana de Ayacucho en los periodos de estudio seleccionados, la finalidad ha sido determinar el comportamiento espacial y temporal de Ts con respecto a las morfologías urbanas, para lo cual se superpone (overlay) la cobertura de expansión urbana (proporcionados por la oficina de Catastro de la Municipalidad provincial de Huamanga) con mapas de ICU y Ts.

3.6.6.1. Análisis lineal de desmezclado espectral

El análisis lineal de descomposición espectral (Unmixing) se realizó para estimar la distribución de superficie impermeable (ISA), un nuevo enfoque de clasificación de usos de suelo urbano basado en el uso combinado de superficies impermeables y el análisis de mezcla espectral (SMA). En este trabajo este procedimiento se utiliza para analizar el comportamiento espacial y temporal de TS planteado en el objetivo 4, para ello se estimaron 4 elementos espectralmente puros ponderados por sus correspondientes fracciones de abundancia, llamados Endmembers (albedo bajo, albedo alto, vegetación y suelo), metodología propuesta por Roberts et al., 1998.

En el modelo de análisis lineal de mezcla espectral de ruidos (NMSA), se utilizó la transformación mínima de fracción de ruido (MNF) para seleccionar tres tipos de endmembers: vegetación, albedo bajo y albedo alto. El procedimiento seguido han sido los siguientes:

- En el algoritmo MNF (Minimum Noise Fraction) del programa TerrSet se ingresa las bandas visibles, infrarrojo cercano y los infrarrojos medios previamente ortorectificadas. Se hace un enmascaramiento del cuerpo de

agua, utilizando una imagen booleana del índice de NDWI para eliminar cuerpos de agua de los datos espectrales.

- En el cálculo se opta por una salida completa, es decir las matrices de varianza/covarianza, de correlación, los valores y vectores propios, y las cargas de los componentes. Según, Green et al., 1988, la transformación MNF es una variante mejorada del análisis de componentes principales (PCA) que ordena los componentes según los ratios de ruido-síñal.

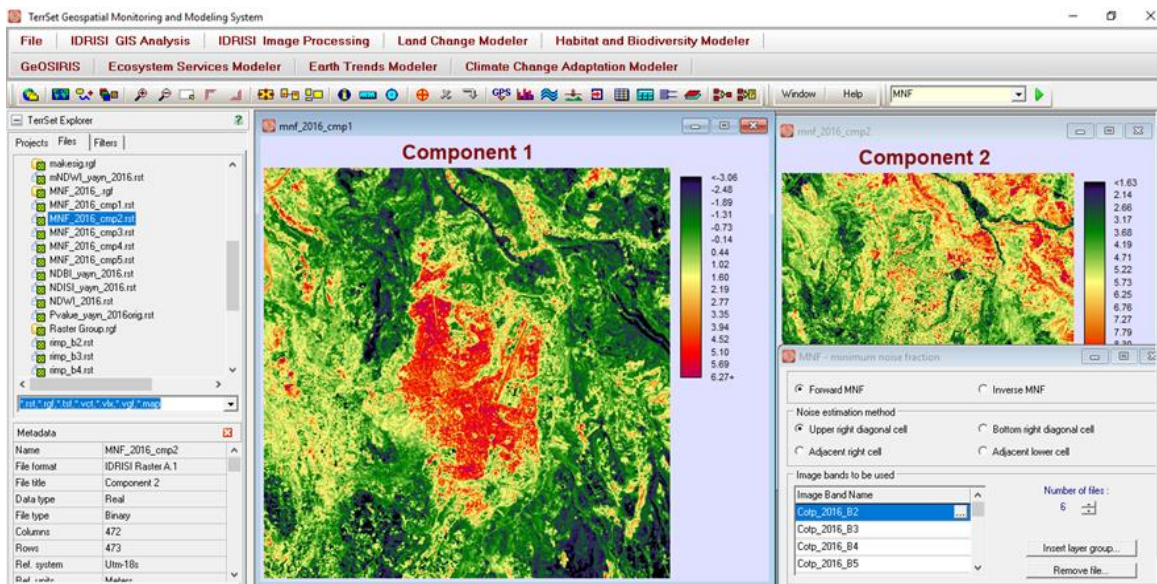


Ilustración 3.9: Aplicación de MNF en TerrSet y resultados para el 2016.

- Mediante una inspección visual de las imágenes de componentes MNF se eligieron los 4 primeros para el análisis posterior, descartando los demás debido a su alta relación señal-ruido.

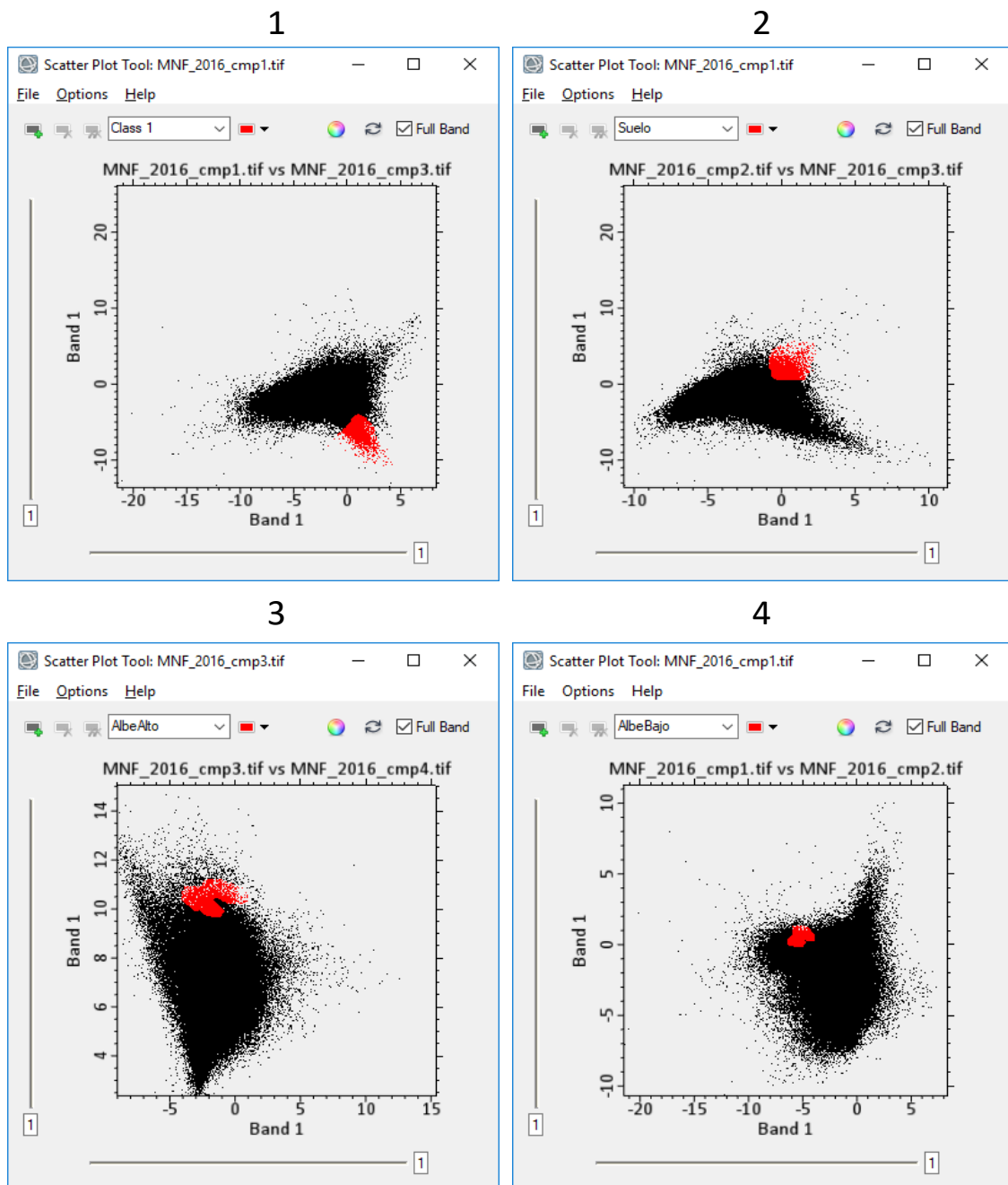


Ilustración 3.10: Diagrama de dispersión de componentes para la identificación de los Endmembers: (1) Vegetación, (2) Suelo, (3) Albedo alto, (4) Albedo bajo.

Los puntos de regiones de interés seleccionados en el Scatter plots de Envi 5.5, mostrados en la Ilustración 3.10, ha sido exportada en formato shapefile y luego convertida a formato raster con el TerrSet.

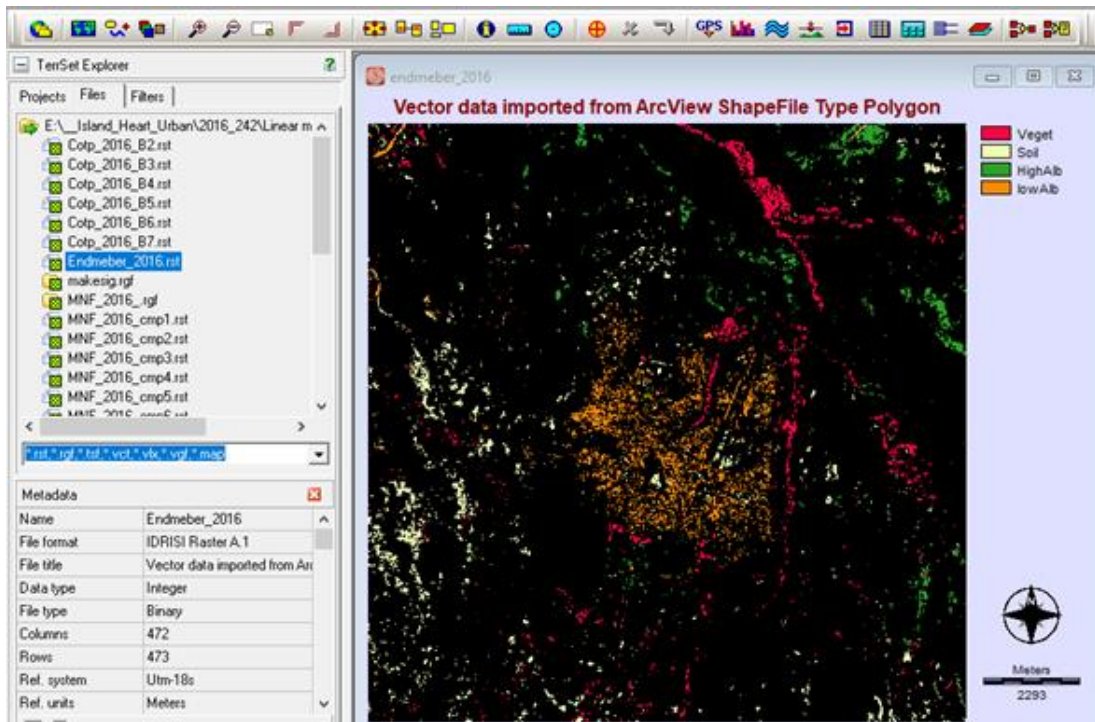


Ilustración 3.11: Pixeles de Endmembers seleccionados para el análisis.

- Con los 4 componentes MNF normalizados, se genera las firmas espectrales de los Endmembers utilizando el algoritmo Makesig, en la aplicación se asignó el tamaño mínimo de muestreo equivalente a 60 pixeles por cada clase. Las firmas espectrales son graficadas con el algoritmo SigComp para comparar con patrones de firmas espectrales existentes en bibliotecas digitales, el objetivo es validar los Endmembers clasificados.

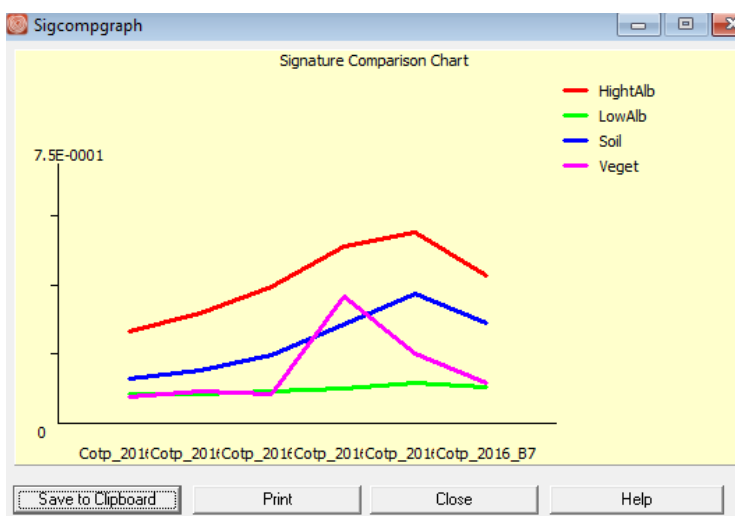


Ilustración 3.12: Firmas espectrales generados de los Endmembers.

- En el algoritmo UnMixing del TerrSet se carga las firmas espectrales y se obtienen imágenes de Endmembers finales. La evaluación de precisión se analizó a través del Error Cuadrático Medio y también comparando con imágenes de alta resolución que poseen información “verdadera” en terreno.

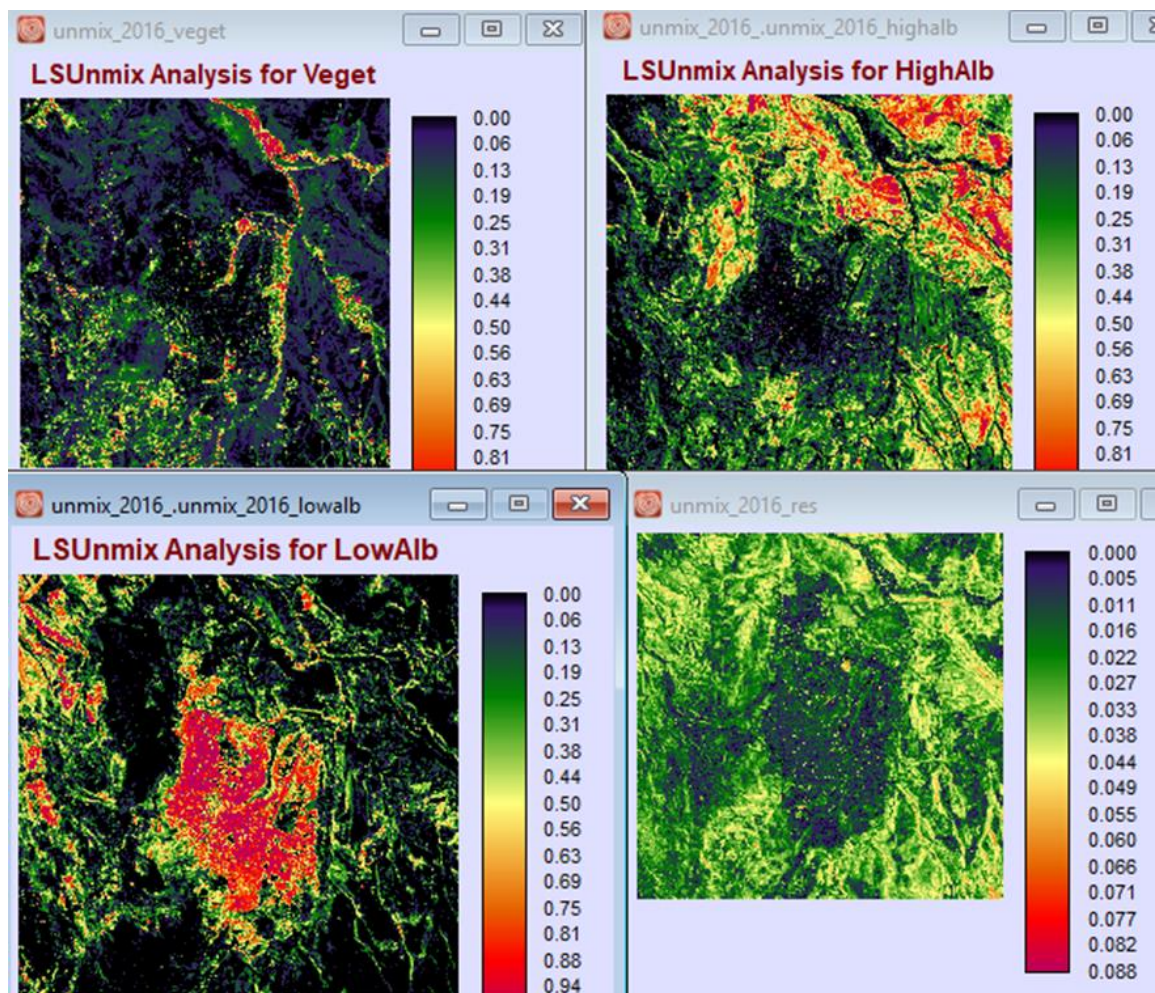


Ilustración 3.13: Fracción de Endmembers resultantes y su residual.

3.6.6.2. Estimación de reflectancia espectral de superficie impermeable

Se extraen los valores de los pixeles de imágenes del Landsat, enmascarando con la imagen de fracciones finales de elementos espectralmente puros, repitiéndose la operación para cada fracción de Endmembers.

Tabla 3.8: Valores promedio de reflectancias extraídos de bandas del Landsat-8, enmascarando con la fracción de albedo alto para el año 2016.

Category	Cotp_2016_B2	Cotp_2016_B3	Cotp_2016_B4	Cotp_2016_B5	Cotp_2016_B6	Cotp_2016_B7
0	0.106627	0.124248	0.152960	0.239400	0.267809	0.205442
1	0.144874	0.171557	0.213347	0.310641	0.387975	0.289793

Debido a la amplia gama de mezclas espectrales presentes en el área urbana, las superficies impermeables pueden poseer valores de albedo alto y bajo; por lo tanto, una mezcla lineal de bajo albedo y alto albedo generalmente es considerado como una buena representación de impermeabilidad. La fracción de superficie impermeable se obtiene haciendo una suma de las fracciones y de su residual, la ecuación propuesta por Wu y Murray (2003) es el siguiente:

$$R_{imp,b} = f_{low}R_{low,b} + f_{high}R_{high,b} + e_b$$

Donde:

$R_{imp,b}$, $R_{low,b}$, $R_{high,b}$ = reflectancia espectral de superficies impermeables para la banda b del Landsat, enmascarado con bajo low y alto $high$ albedo,

f_{low} , f_{high} = fracción de bajo albedo y alto albedo, debiéndose cumplir la condición de $f_{low} + f_{high} = 1$; y, f_{low} , $f_{high} \geq 0$,

M = número total de bandas,

e_b = error residual o residuo no modelado por la banda b, el error debe ser pequeño para considerar efectivo. El error cuadrático medio se calcula con la expresión:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^M e_b^2}{M}}$$

CAPÍTULO IV :

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis de variables y su incidencia en el fenómeno de ICU

En total se procesaron 17 variables, de las cuales 12 fueron seleccionados para la aplicación del modelo ICU adaptado para el área de estudio. Las variables han sido elaboradas en formato raster con el procedimiento señalado en la metodología, para un mejor análisis de influencia de cada variable en el fenómeno de la Isla de Calor Urbana se ha realizado una regresión de componentes principales (ACP), método considerado superior en estimación y predicción con respecto al método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), puesto que en este trabajo se utilizan variables multicolineales y los estimadores MCO no son confiables por presentar elevada correlación y una alta inestabilidad en la varianza.

Luego de analizar la multicolinealidad de las variables, se seleccionaron un grupo apropiado para ser usadas en la ecuación del modelo ICU para la ciudad de Ayacucho, es decir se ajustaron las variables de predicción usando la menor cantidad posible de variables explicativas o regreso.

En la tabla 4.1 se muestra las variables analizadas en este estudio

Tabla 4.1: Variables elaborados y analizados en el estudio de ICU, periodo 2016.

Variables	Código	Calificación
Albedo de superficie terrestre	Albsup_2016	Seleccionado
Elevación digital del terreno	Altitud	Descartado
Aspecto del terreno	Aspect	Descartado
Índice de suelo desnudo	BI_2016	Seleccionado
Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas	EBBI_2016	Seleccionado
Índice de suelo urbanizado	IU_2016	Seleccionado
Índice de humedad de hojas	LWCI_2016	Descartado
Índice modificado de contenido de agua de diferencia	MNDWI_2016	Seleccionado

normalizada		
Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada	NDBal_2016	Seleccionado
Índice de edificaciones de diferencia normalizada	NDBuI_2016	Seleccionado
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI_2016	Descartado
Presión real de vapor de agua	PvWreal_2016	Seleccionado
Índice de vegetación ajustada al suelo	SAVI_2016	Seleccionado
Pendiente del terreno	Slope	Descartado
Factor visión del cielo	SVF_2016	Seleccionado
Temperatura de superficie terrestre	TS_2016	Seleccionado
Velocidad del viento	Windspeed_2016	Seleccionado
Total	17	12

Para el análisis de colinealidad se realizaron corridas de ACP utilizando el software TerrSet. La tabla 4.2 resume los resultados de la operación, en donde se muestra la matriz de varianza/covarianza y la matriz de correlación obtenido con la aplicación del análisis tipo Forward T-Mode y la opción no estandarizada, que utiliza la matriz de varianza/covarianza, matriz estadísticamente centrada y expresa variabilidad con respecto a la media.

En la tabla 4.2, las variables señaladas con letras rojas son aquellas correlacionadas con una o más variables, siendo las resaltadas en amarillo las que finalmente fueron descartados. Entre ellos están las variables geográficas de altitud, pendiente y el aspecto o exposición del terreno; a pesar que éstas influyen en la radiación solar, el régimen de vientos, la humedad ambiental etc., por tanto condicionantes importantes en la generación del fenómeno ICU en un territorio, estas variables tienen muy alta varianza con respecto a las demás incluso cuando son normalizadas, indicando qué tan dispersos están los datos alrededor de su media. Si la proporción de la varianza explicada con la varianza no explicada es alta, las medias son estadísticamente diferentes, por la cual se opta descartar del modelo. Por otra parte, estas variables se utilizan en la obtención de variables intermedios, por ejemplo la altitud en el ajuste de la variable velocidad del viento y la presión de vapor de agua; el aspecto del terreno en el modelo de sombreado en la corrección topográfica de imágenes satelitales.

La variable NDVI se correlaciona con LWCI y MNDWI, al igual que SAVI se correlaciona con estas variables, por ello se selecciona la variable SAVI porque es mejor indicador de vegetación para zonas de montaña y zonas de escasa cobertura vegetal; el NDVI también es utilizada en la obtención de variables intermedias como la emisividad en el cálculo de temperatura de superficie. Al igual, la variable MNDWI es mejor que LWCI, esta última es indicadora de humedad de hojas de la vegetación, mientras el MNDWI es indicadora de humedad de la vegetación y del grado de saturación de humedad del suelo.

El Albedo se correlaciona con el NDBal, el EBBI con las variables BI y NDBul, pese a ello se dejan para el análisis por tratarse de índices que utilizan distintas longitudes de onda del espectro electromagnético de las imágenes satelitales; por lo tanto, son índices que se complementan bien en estudios urbanos.

En teledetección, la adquisición de imágenes en bandas adyacentes del espectro implica, con frecuencia, detectar información redundante. Por ello, los DN (digital number) de los píxeles de un índice temático pueden presentar una importante relación con los de otra, resultando una o más de una de ellas irrelevantes; este inconveniente de información redundante en el modelo de ICU es corregido con la aplicación del APC.

Tabla 4.2: Correlación de variables analizadas en el estudio de ICU.

T-MODE VAR/COVAR	Albsup_2016	Altitud	Aspect	BI_2016	EBBI_2016	IU_2016	LWCI_2016	MNDWI_2016	NDBal_2016	NDBul_2016	NDVI_2016	PvWreal_2016	SAVI_2016	Slope	SVF_2016	TS_2016	Windspeed_2016
Albsup_2016	0.0046	-1.4297	0.1743	0.0005	0.0004	-0.0002	-0.0001	-0.0005	-0.0014	-0.0003	-0.0018	0.0000	0.0001	-0.1662	0.0022	0.0882	0.0002
Altitud	-1.4297	64,035.9963	614.7820	0.5632	-0.4071	-2.7249	-0.9821	13.4010	0.0989	-1.1968	1.8056	2.9098	1.1845	209.7775	5.0958	99.7648	-9.3973
Aspect	0.1743	614.7820	12,868.4884	0.1457	0.0201	-1.2084	-0.2799	-0.0941	-0.3230	-0.0284	-0.3260	0.0618	-0.1041	-34.5347	1.3242	-189.0390	-0.0902
BI_2016	0.0005	0.5632	0.1457	0.0021	0.0010	0.0026	-0.0013	-0.0023	-0.0005	0.0023	-0.0017	-0.0001	-0.0010	0.0630	0.0009	0.0609	-0.0001
EBBI_2016	0.0004	-0.4071	0.0201	0.0010	0.0006	0.0017	-0.0003	-0.0007	-0.0003	0.0013	-0.0005	-0.0001	-0.0003	0.0287	0.0003	0.0310	0.0001
IU_2016	-0.0002	-2.7249	-1.2084	0.0026	0.0017	0.0291	-0.0002	-0.0064	-0.0003	0.0041	-0.0024	-0.0005	-0.0018	-0.0810	0.0001	0.0556	0.0004
LWCI_2016	-0.0001	-0.9821	-0.2799	-0.0013	-0.0003	-0.0002	0.0048	0.0074	0.0002	-0.0007	0.0039	-0.0001	0.0027	-0.0576	-0.0007	-0.0254	0.0001
MNDWI_2016	-0.0005	13.4010	-0.0941	-0.0023	-0.0007	-0.0064	0.0074	0.0319	0.0001	-0.0023	0.0127	0.0003	0.0087	-0.1428	0.0007	0.0160	-0.0020
NDBal_2016	-0.0014	0.0989	-0.3230	-0.0005	-0.0003	-0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	-0.0004	0.0006	0.0000	0.0000	0.0330	-0.0008	-0.0207	0.0000
NDBul_2016	-0.0003	-1.1968	-0.0284	0.0023	0.0013	0.0041	-0.0007	-0.0023	-0.0004	0.0030	-0.0010	-0.0003	-0.0008	0.1045	0.0001	0.0449	0.0002
NDVI_2016	-0.0018	1.8056	-0.3260	-0.0017	-0.0005	-0.0024	0.0039	0.0127	0.0006	-0.0010	0.0068	-0.0001	0.0041	-0.0068	-0.0016	-0.0532	-0.0003
PvWreal_2016	0.0000	2.9098	0.0618	-0.0001	-0.0001	-0.0005	-0.0001	0.0003	0.0000	-0.0003	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0150	0.0003	0.0030	-0.0004
SAVI_2016	0.0001	1.1845	-0.1041	-0.0010	-0.0003	-0.0018	0.0027	0.0087	0.0000	-0.0008	0.0041	0.0000	0.0028	-0.0571	-0.0003	-0.0107	-0.0002
Slope	-0.1662	209.7775	-34.5347	0.0630	0.0287	-0.0810	-0.0576	-0.1428	0.0330	0.1045	-0.0068	0.0150	-0.0571	90.3085	-0.3835	-1.4449	-0.0308
SVF_2016	0.0022	5.0958	1.3242	0.0009	0.0003	0.0001	-0.0007	0.0007	-0.0008	0.0001	-0.0016	0.0003	-0.0003	-0.3835	0.0286	0.0866	-0.0007
TS_2016	0.0882	99.7648	-189.0390	0.0609	0.0310	0.0556	-0.0254	0.0160	-0.0207	0.0449	-0.0532	0.0030	-0.0107	-1.4449	0.0866	16.7804	-0.0146
Windspeed_2016	0.0002	-9.3973	-0.0902	-0.0001	0.0001	0.0004	0.0001	-0.0020	0.0000	0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0002	-0.0308	-0.0007	-0.0146	0.0014

T-MODE COR. MATRIX	Albsup_2016	Altitud	Aspect	BI_2016	EBBI_2016	IU_2016	LWCI_2016	MNDWI_2016	NDBal_2016	NDBul_2016	NDVI_2016	PvWreal_2016	SAVI_2016	Slope	SVF_2016	TS_2016	Windspeed_2016
Albsup_2016	1	-0.083	0.023	0.151	0.213	-0.019	-0.022	-0.039	-0.883	-0.082	-0.316	-0.041	0.015	-0.257	0.193	0.316	0.083
Altitud	-0.083	1	0.021	0.048	-0.064	-0.063	-0.056	0.297	0.017	-0.086	0.086	0.661	0.088	0.087	0.119	0.096	-1.000
Aspect	0.023	0.021	1	0.028	0.007	-0.062	-0.036	-0.005	-0.124	-0.005	-0.035	0.031	-0.017	-0.032	0.069	-0.407	-0.021
BI_2016	0.151	0.048	0.028	1	0.898	0.332	-0.402	-0.284	-0.494	0.893	-0.445	-0.147	-0.421	0.144	0.114	0.323	-0.048
EBBI_2016	0.213	-0.064	0.007	0.898	1	0.402	-0.166	-0.165	-0.560	0.931	-0.237	-0.262	-0.200	0.121	0.072	0.303	0.064
IU_2016	-0.019	-0.063	-0.062	0.332	0.402	1	-0.019	-0.211	-0.086	0.440	-0.174	-0.178	-0.202	-0.050	0.005	0.080	0.063
LWCI_2016	-0.022	-0.056	-0.036	-0.402	-0.166	-0.019	1	0.600	0.147	-0.193	0.675	-0.050	0.722	-0.088	-0.056	-0.089	0.056
MNDWI_2016	-0.039	0.297	-0.005	-0.284	-0.165	-0.211	0.600	1	0.015	-0.238	0.861	0.085	0.916	-0.084	0.022	0.022	-0.297
NDBal_2016	-0.883	0.017	-0.124	-0.494	-0.560	-0.086	0.147	0.015	1	-0.291	0.301	0.109	0.014	0.151	-0.195	-0.219	-0.017
NDBul_2016	-0.082	-0.086	-0.005	0.893	0.931	0.440	-0.193	-0.238	-0.291	1	-0.210	-0.289	-0.277	0.199	0.007	0.199	0.086
NDVI_2016	-0.316	0.086	-0.035	-0.445	-0.237	-0.174	0.675	0.861	0.301	-0.210	1	-0.056	0.930	-0.009	-0.116	-0.157	-0.086
PvWreal_2016	-0.041	0.661	0.031	-0.147	-0.262	-0.178	-0.050	0.085	0.109	-0.289	-0.056	1	-0.036	0.091	0.111	0.043	-0.661
SAVI_2016	0.015	0.088	-0.017	-0.421	-0.200	-0.202	0.722	0.916	0.014	-0.277	0.930	-0.036	1	-0.113	-0.032	-0.049	-0.088
Slope	-0.257	0.087	-0.032	0.144	0.121	-0.050	-0.088	-0.084	0.151	0.199	-0.009	0.091	-0.113	1	-0.239	-0.037	-0.087
SVF_2016	0.193	0.119	0.069	0.114	0.072	0.005	-0.056	0.022	-0.195	0.007	-0.116	0.111	-0.032	-0.239	1	0.125	-0.119
TS_2016	0.316	0.096	-0.407	0.323	0.303	0.080	-0.089	0.022	-0.219	0.199	-0.157	0.043	-0.049	-0.037	0.125	1	-0.096
Windspeed_2016	0.083	-1.000	-0.021	-0.048	0.064	0.063	0.056	-0.297	-0.017	0.086	-0.086	-0.661	-0.088	-0.087	-0.119	-0.096	1

Se ha determinado que las variables físicas sobredimensionan la varianza total explicada, por ello han sido descartados del análisis. En consecuencia, para identificar la importancia de las variables ambientales y parámetros urbanos que caracterizan o inciden en el fenómeno de la isla de calor urbana, se analizan la estructura de correlación entre un grupo de variables y de los pesos de aporte.

El orden en la cual inciden se valoran del 1 al 5 (Tabla 4.3), ordenadas en forma decreciente por su aporte en la formación de los variables latentes (factores) que explican la asociación entre las variables manifiestas, que nos permita explicar de la mejor manera la formación del fenómeno ICU en la ciudad de Ayacucho.

Tabla 4.3: Orden de incidencia de variables seleccionadas en la formación del fenómeno ICU.

VARIABLES	CÓDIGO	1986	1996	2006	2016
Albedo de superficie terrestre	Alsup	3	4	3	3
Índice de suelo desnudo	BI	2	2	1	1
Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas	EBBI	2	2	1	1
Índice de suelo urbanizado	IU	1	3	1	4
Índice modificado de contenido de agua de diferencia normalizada	MNDWI	4	5	4	5
Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada	NDBal	3	4	3	3
Índice de edificaciones de diferencia normalizada	NDBuI	2	2	1	1
Presión real de vapor de agua	PvWreal	1	1	2	2
Índice de vegetación ajustada al suelo	SAVI	4	5	4	5
Factor visión del cielo	SVF	1	3	1	4
Temperatura de superficie terrestre	TS	5	2	5	3
Velocidad del viento	Windspeed	1	1	2	2

En los 4 periodos estudiados, el orden de incidencia de las variables queda de siguiente manera: 1) BI, EBBI, NDBuI, PvWreal y Windspeed; 2) IU y SVF; 3)

Albsup y NDBal; 4) Ts; y, 5) MNDWI y el SAVI. La formación del dendrograma de incidencia de las variables analizadas se muestra en el siguiente gráfico.

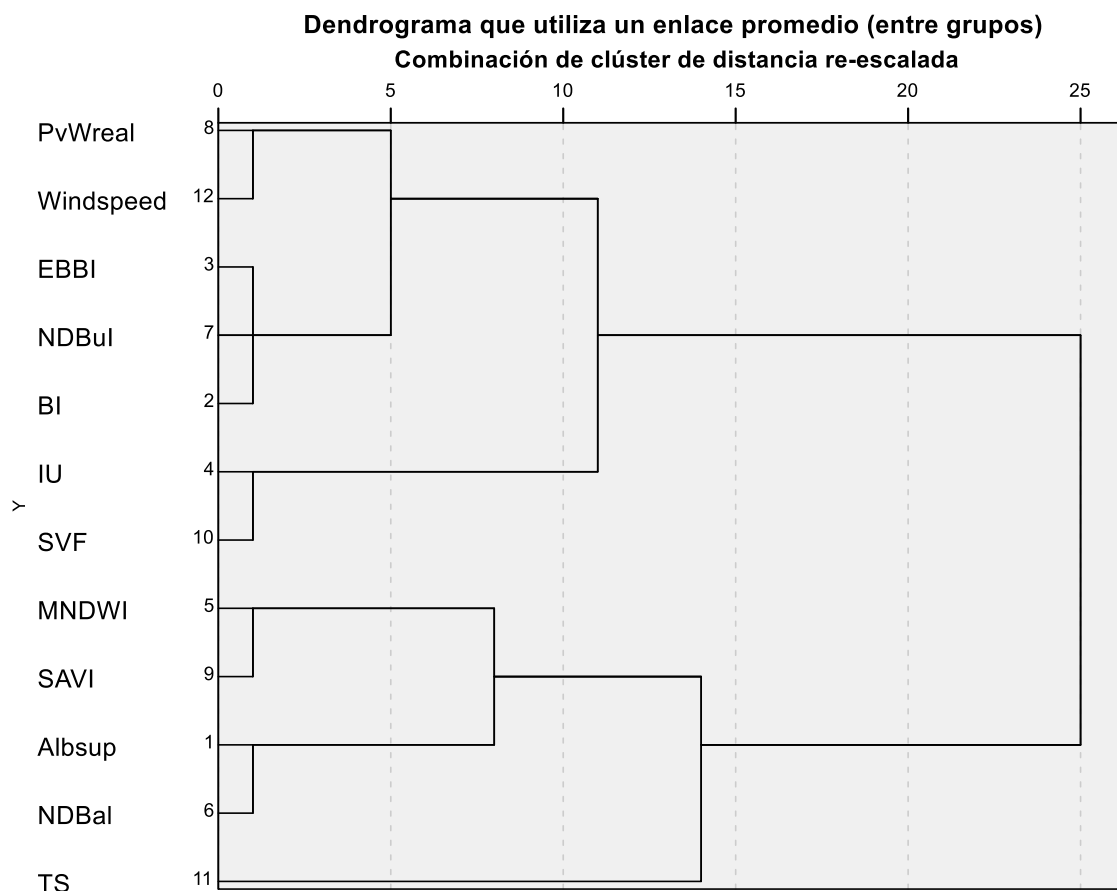


Ilustración 4.1: Formación de grupo de variables según el orden de incidencia en el fenómeno ICU durante el periodo 1986 y 2016.

4.2. Estimación del índice de islas de calor urbana

4.2.1. Obtención de factores sintéticos a través del ACP

Mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) se resumen un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original (Chuvienco, 1996). En teledetección, el objetivo del ACP es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas cualidades de las imágenes, incrementando la eficiencia computacional de la clasificación porque reduce la dimensionalidad de los datos. Por otra parte, desde el punto de vista estadístico facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de los índices

temáticos y aquellos otros que son específicos de algún grupo de ellas (Chuvieco, opcit).

El ACP es usado para detectar cambios temporales, donde los primeros componentes resultantes recogen información común a las distintas fechas (la estable), mientras los últimos componentes ofrecen la información no común (el cambio) que es lo que interesa en estudios multitemporales. Algebraicamente, el ACP genera nuevas variables (componentes), mediante una combinación lineal de las variables originales (índices temáticos). Aunque se requieren los componentes principales para reproducir la variabilidad total, muchas veces la mayor parte de ella está contenida en un número menor de componentes. En ese caso, reemplazando los índices por los componentes, se reduce la dimensionalidad del problema conservando casi la totalidad de la información.

El resultado de un ACP realizado en este trabajo incluye: 1) El valor propio (eigenvalue) de cada componente, que indica la varianza absorbida por el mismo; 2) Una matriz de vectores propios (eigenvectors) que permiten calcular los valores de cada componente a partir de las variables originales. Estos valores y vectores propios se obtienen a partir de la matriz de covarianzas porque se trabajan con valores de reflectividad.

Los módulos de ACP con el programa TerrSet han proporcionado: 1) Mapas de valores de los componentes; 2) Los valores propios para determinar el porcentaje de varianza explicada por componente; 3) La matriz de vectores propios que permite determinar el peso de las variables en cada componente. Aunque el ACP es una técnica estadística sin significado físico, ha permitido establecer hipótesis de tipo físico analizando la matriz de vectores propios, tanto el signo como la magnitud de las correlaciones.

El ACP en su primera fase permitió identificar aquellos rasgos que se recogen en la mayor parte de los índices temáticos y aquellos otros que son específicos a algún grupo de ellas. A partir de la matriz de varianza-covarianza de los índices que componen la imagen original se extraen los autovalores que expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y, en última instancia, la proporción de información original que retienen. Este dato resulta de gran interés para decidir que componentes principales son más interesantes, habitualmente los que mayor información original retengan. Tal y como se obtienen los CP, el autovalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis. La varianza original explicada por cada componente se calcula como la proporción de su autovalor frente a la suma de todos los autovalores.

En definitiva, para interpretar el sentido de las nuevas variables se requiere conocer su relación con las originales, su interpretación se basa en teorías y no en especulaciones. Por otra parte, para calcular las ecuaciones y obtener las nuevas imágenes se precisa analizar los coeficientes de la transformación; ambos aspectos se abordan a partir de los autovectores. El autovector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de los índices temáticos originales para obtener el nuevo CP; es decir, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo los índices de la imagen las variables independientes y los CP las dependientes.

A partir de los autovectores se calcula la matriz de correlación entre el CP y las imágenes originales, lo que nos permite conocer el sentido espectral de estos componentes, siendo necesario tener en cuenta que los coeficientes factoriales debe ser próximos a 1, una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor, y los factores no deben tener coeficientes similares.

De todas las combinaciones lineales posibles, los componentes principales son aquellas que no están correlacionadas y tienen máxima varianza. Con respecto a la matriz de correlación en el análisis correspondiente al año 1986, el ALBsup está correlacionada con NDBal; el BI presenta correlación con el EBBI, NDBul y NDBul; el MNDWI con el SAVI; el PvWreal con el WindSpeed y SVF; por lo tanto

se debería excluir del análisis una de estas variables, pero se dejan porque se comportan de manera diferente, además estas variables tienen alta varianza-covarianza como tal son importantes en el análisis.

Los autovalores calculados a partir de la matriz de varianza/covarianza, para el año 1986, son: 0.162713, 0.087692, 0.03004, 0.020412, 0.014375, 0.009202, 0.00442, 0.001101, 0.000386, 0.000273, 0.000114 y 1.70E-10. Mientras la proporción de varianza total explicada por cada componente resultante es 49.20% para el primer componente; 26.51% para el segundo; 9.08% para el tercero, 6.17% para el cuarto; 4.35% para el quinto, 2.78% para el sexto, 1.34% para el séptimo, 0.33% para el octavo, 0.12% para el noveno, 0.08% para el décimo, 0.03% para undécimo y 5.15E-08% para el duodécimo componente.

De acuerdo a estos porcentajes, seleccionando los 5 primeros componentes, retienen o sintetizan el 95.31% de la varianza original de las imágenes; mientras que con el sexto retienen en conjunto el 98.1% de la variabilidad total. Teniendo presente que el objetivo es reducir la dimensionalidad de los datos, se podría pensar que los 5 componentes conservan casi la totalidad de la información. Una vez analizados los componentes, para determinar cuántos de ellos incluir se aplicaron tres criterios, siendo estos:

- a) Al graficar los porcentajes de la varianza total explicada por componente, o equivalentemente los autovalores, considerando el punto de inflexión de la curva se debería retener los 6 primeros componentes.

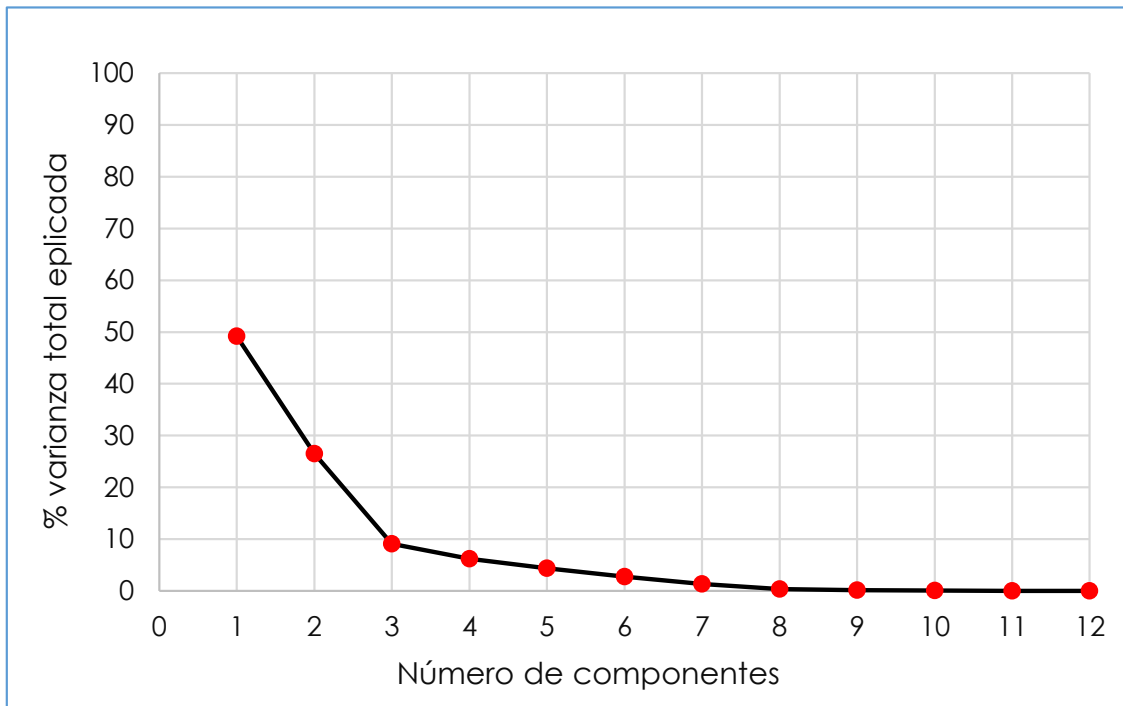


Ilustración 4.2: Porcentaje de la variación total explicada para el año 1986.

- b) Considerando componentes cuyos autovalores son mayores al promedio (0.03) solamente se deberían retener los 3 componentes ($\lambda=0.1627$, $\lambda=0.0877$ y $\lambda=0.03$); del cuarto componente en adelante se debería descartar.
- c) Para examinar las correlaciones entre imágenes originales y los componentes se analizan los coeficientes de correlación que aparecen en la tabla LOADING. Por ejemplo, el componente 1 con el UI tiene correlación positiva de 0.894, con PvWreal es -0.765, con SVF es 0.761 y con WindSpeed es 0.766; este componente retiene información de morfología urbana asociado a los desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público. De esta tabla se puede concluir que el UI es la que más contribuyen al componente 1 ($r=0.89$), mientras que el MNDWI tiene el menor aporte ($r=0.02$). Asimismo, toda la contribución de los índices de vegetación y la humedad están en el componente 4 ($r=-0.81$ y $r=-0.66$) que, por otro lado, tiene poca correlación con las restantes índices temáticos. Los valores pequeños de los coeficientes de correlación del componente 5 en adelante, indicarían que sólo deberían incluirse los componentes 1 al 5.

Finalmente, de acuerdo a los criterios expuestos se eligieron los componentes 1, 2, 3, 4 y 5; de esta manera para el año 1986 se establecen 5 factores, siendo los siguientes:

- Primer factor, Fc1-MuAsDc: Morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociado a los desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público urbano, su aporte al ICU es positivo.
- Segundo factor, Fc2-EuSdi: Edificaciones urbanas y superficies desnudas e impermeables para el almacenamiento de calor en estructuras y aire, como línea de base el factor aporta al ICU en forma negativo debido a la baja densidad de edificaciones y la preponderancia de construcciones de barro y piedra.
- Tercer factor, Fc3-RsCotmRt: Reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico o comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y la emisión de calor, aporta al ICU en forma positivo.
- Cuarto factor, Fc4-VDmvHs: Variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, aporta al ICU en forma negativo.
- Quinto factor, Fc5-CetsIsa: Capacidad de emisividad térmica de superficies para el intercambio de energía suelo-aire, aporta al ICU en forma positivo. Los factores para el año 1986 se muestran en la Ilustración 4.3.

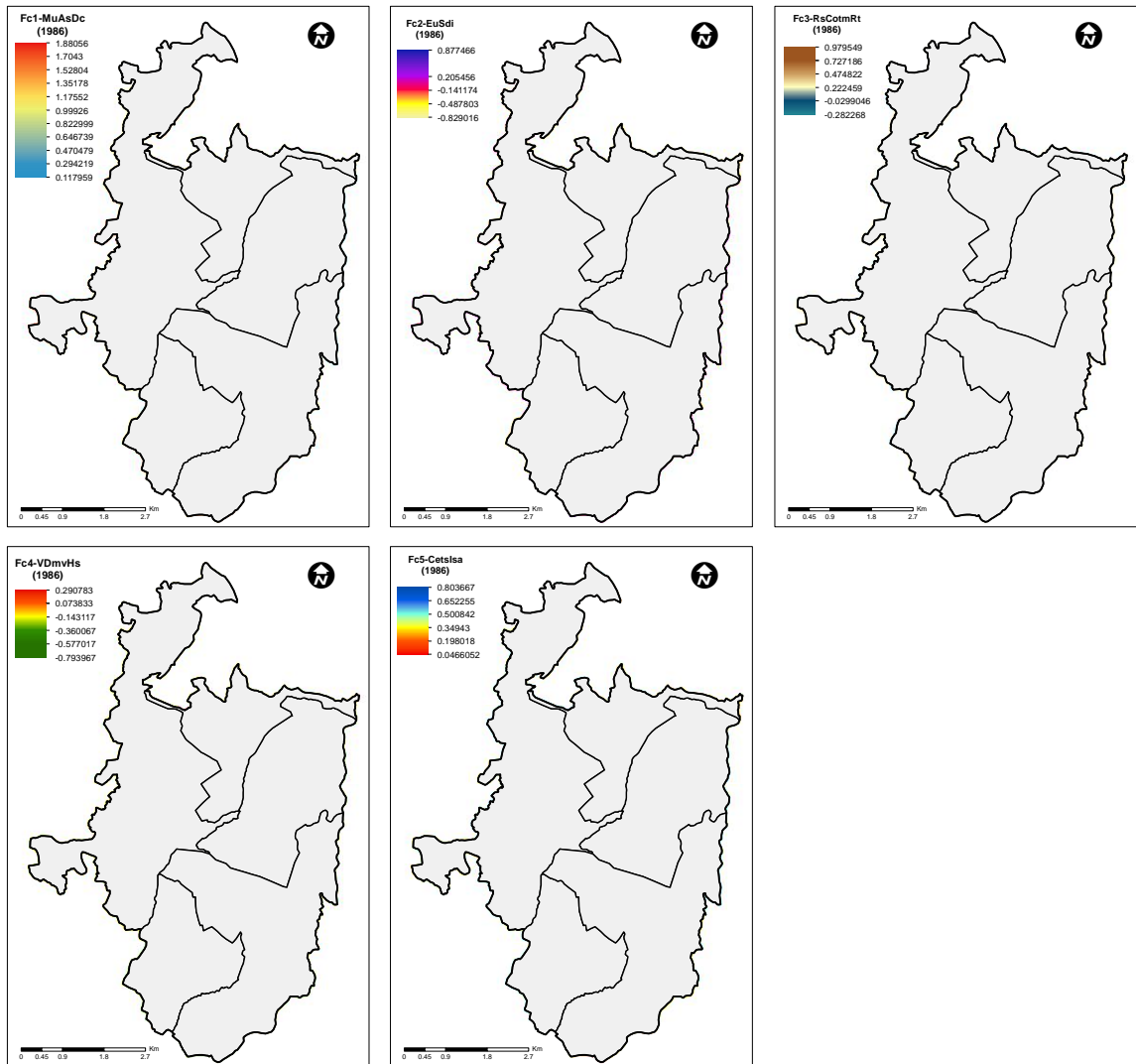


Ilustración 4.3: Factores sintéticos establecidos para el periodo 1986.

Con el mismo procedimiento, para el periodo 1996 también se determinaron 5 componentes, estos factores son los siguientes:

- Fc1-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano. Este factor como tal es nueva porque en el 1986 resulta en combinación con variables urbanas, por ello como línea de base el aporte al ICU se considera positivo en razón al concepto de gradiente vertical de la temperatura, donde localidades de pisos más bajos registran mayor temperatura y mayor presión atmosférica.
- Fc2-CetsEusa, capacidad de emisividad térmica de superficies, edificaciones urbanas y superficies desnudas e impermeables, el aporte es positivo.

- Fc3-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc4-RsCotmRt, reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es negativo.
- Fc5-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo. Los factores para el año 1996 se muestran en la Ilustración 4.4.

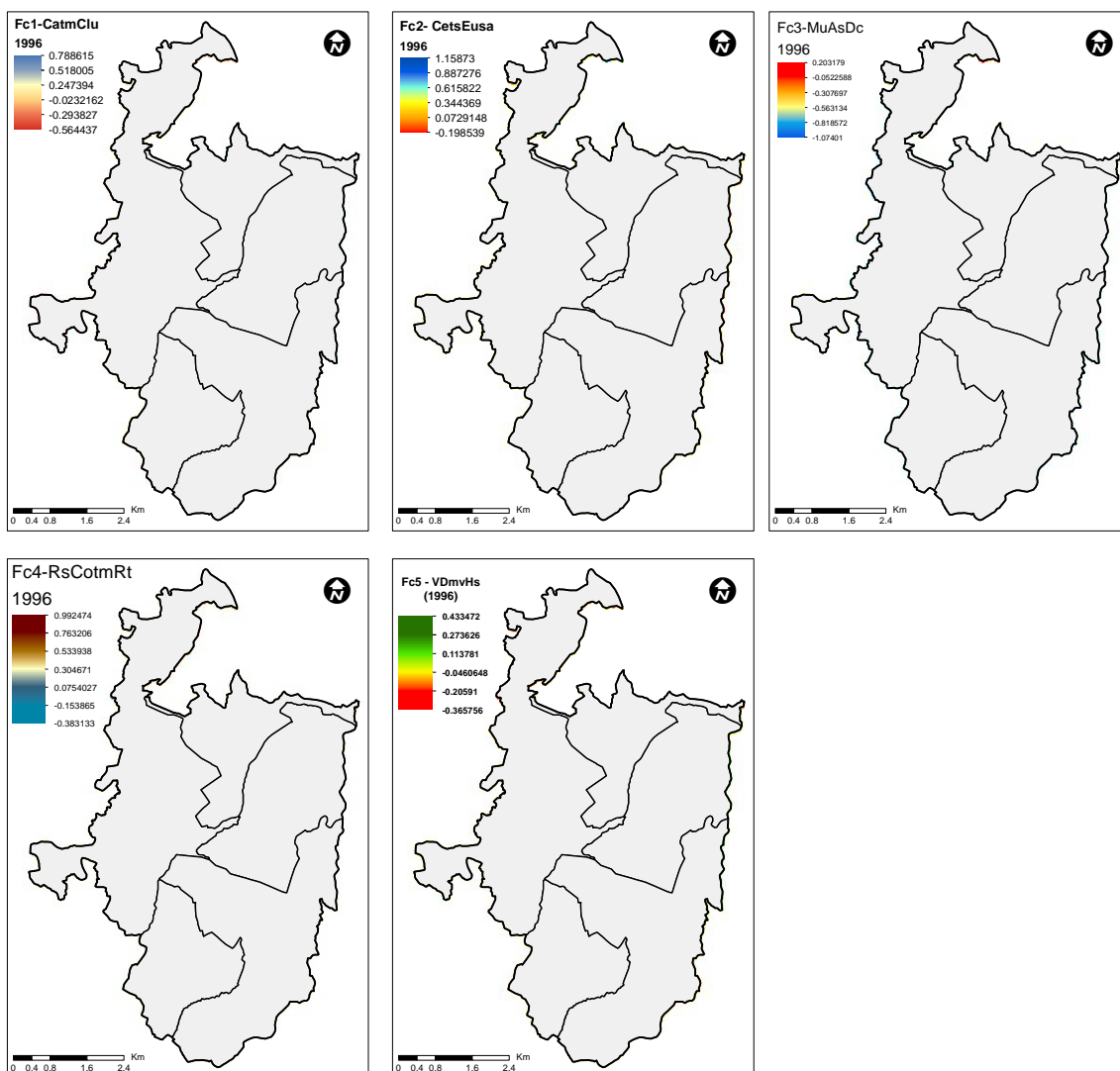


Ilustración 4.4: Factores sintéticos determinados para el periodo 1996.

Para el periodo 2006, los 5 factores determinados han sido los siguientes:

- Fc1-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc2-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano, el aporte es positivo.
- Fc3-RsCotmRt, reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es positivo.
- Fc4-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo.
- Fc5-Cetslsa, capacidad de emisividad térmica de superficies para el intercambio de energía superficie-aire, el aporte es positivo. Los factores sintéticos para el año 2006 se muestran en la Ilustración 4.5.

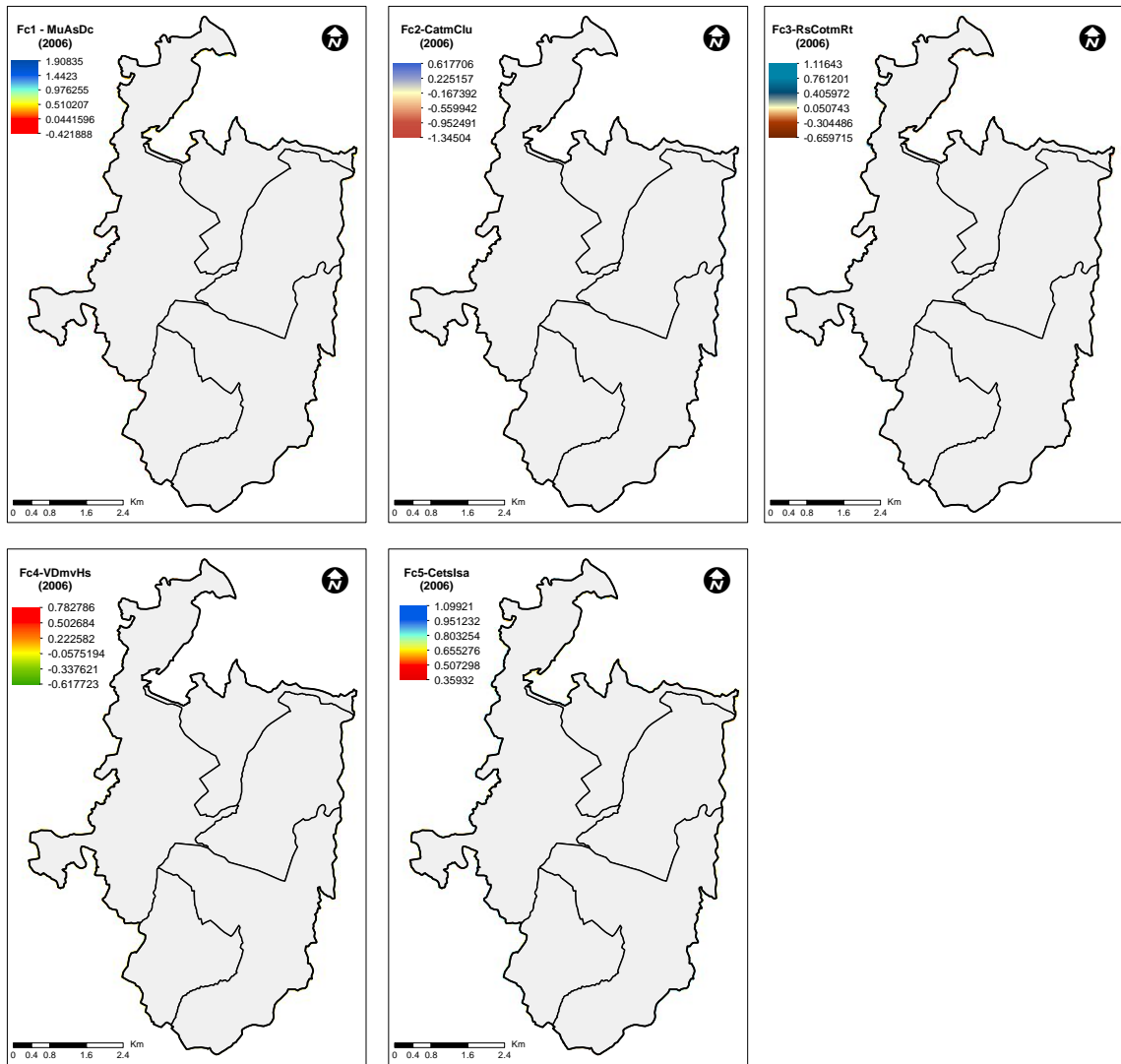


Ilustración 4.5: Factores sintéticos determinados para el periodo 2006.

Para el periodo 2016, los 5 factores establecidos para el análisis de ICU han sido los siguientes:

- Fc1-EuSdiRtm, edificaciones urbanas, superficies desnudas-impermeables y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es positivo.
- Fc2-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano, el aporte es negativo.
- Fc3-CetsResm capacidad de emisividad térmica y reflectividad de superficies, el aporte es positivo.

- Fc4-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc5-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo. Los factores determinados para el año 2016 se muestran en la Ilustración 4.6.

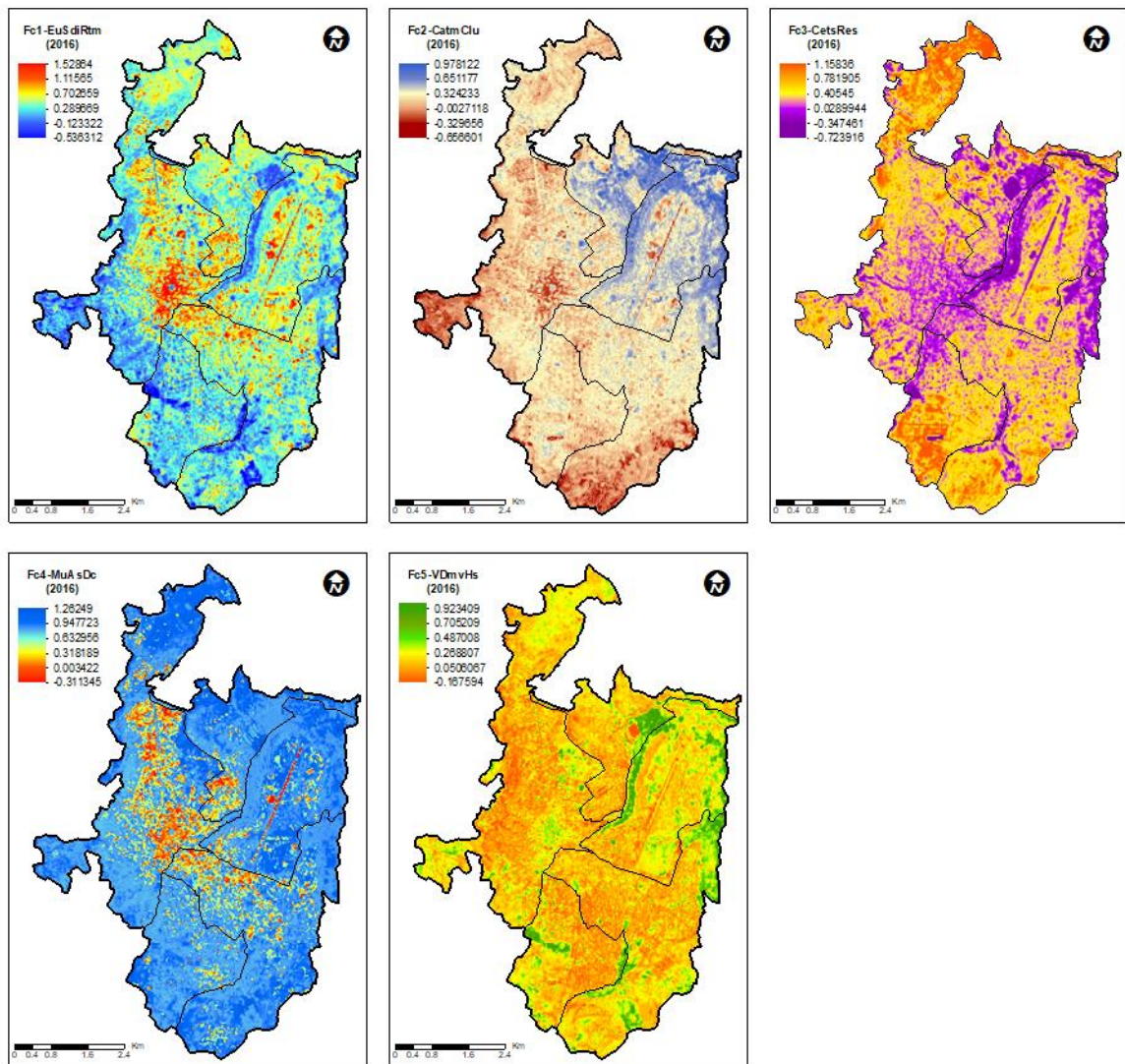


Ilustración 4.6: Factores sintéticos determinados para el periodo 2016.

4.2.2. Estimación del índice de islas de calor urbano (IICU)

Dado que los factores del IICU son diferentes y representan a diversos aspectos, es necesario combinar en un índice temático, para lo cual en este trabajo se desarrolló un modelo de IICU para cada periodo de estudio. Para crear los mapas de IICU se realizaron una operación algebraica de imágenes en formato raster, utilizando el porcentaje de varianza de cada factor explicado (ver Tablas 4.3 al 4.6) como peso, y según su contribución positiva o negativa al IICU en la operación se asigna un signo positivo o negativo, todo dividido entre 100. Las ecuaciones desarrolladas para cada periodo han sido las siguientes:

$$IICU_{1986} = \frac{[(49.198455 * Fc1) - (26.51481 * Fc2) + (9.083098 * Fc3) - (6.171889 * Fc4) + (4.346381 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{1996} = \frac{[(47.041879 * Fc1) + (24.439776 * Fc2) + (14.34838 * Fc3) - (9.369814 * Fc4) - (2.954459 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{2006} = \frac{[(42.115611 * Fc1) + (33.681858 * Fc2) + (10.599285 * Fc3) - (5.365976 * Fc4) + (3.447844 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{2016} = \frac{[(31.96875 * Fc1 - (24.558254 * Fc2) + (22.901995 * Fc3) + (9.416727 * Fc4) - (7.846527 * Fc5)]}{100}$$

En general, las puntuaciones que resultan de la operación han sido normalizadas con la finalidad de reescalar los valores negativos; por ejemplo, para el año 2016 las puntuaciones varían entre -0.18 y 1.18. El índice IICU normalizado varía entre 0 y 1, que representan a nula y alta ocurrencia del fenómeno de islas de calor urbano, respectivamente.

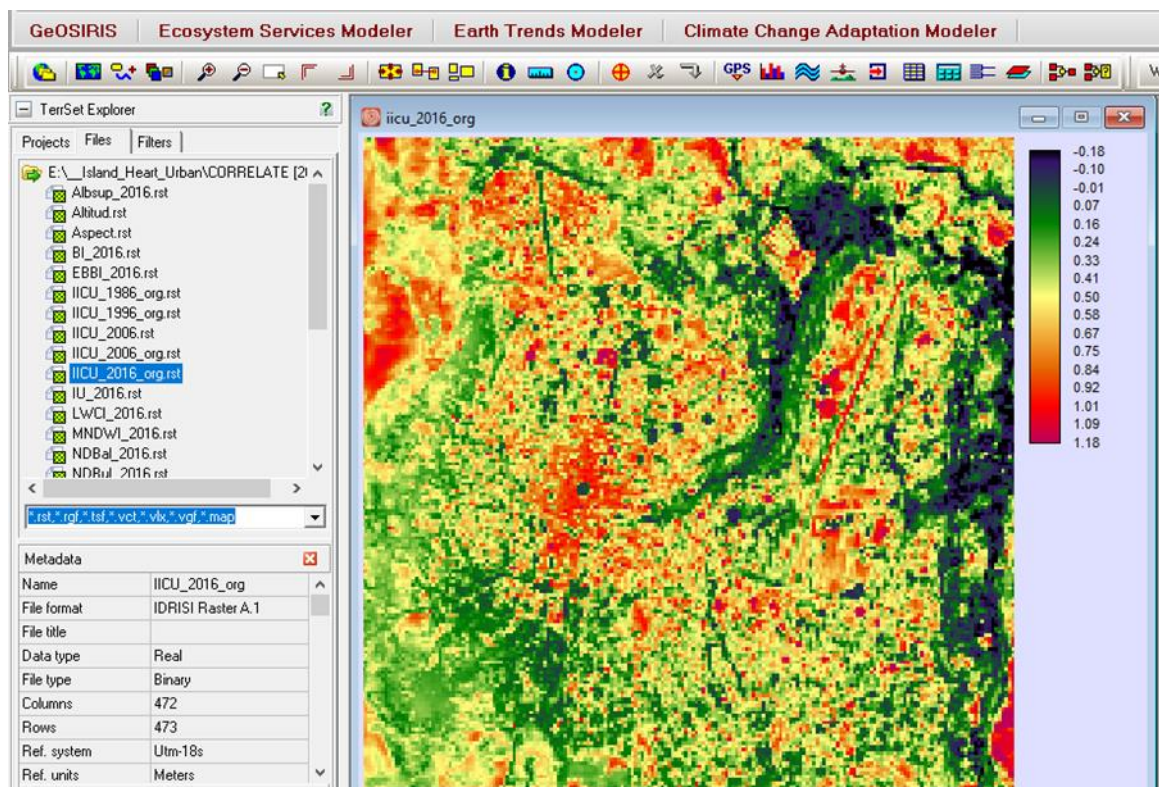


Ilustración 4.7: Puntuaciones de IICU resultante para el año 2016.

En la Ilustración 4.8 se presenta los resultados en mapas, donde el color rojo intenso indica las zonas con presencia del fenómeno de isla de calor, mientras el color azul oscuro indica a las zonas con ausencia de ICU. Mediante un análisis visual de los mapas se observa que el fenómeno del ICU en la ciudad de Ayacucho empieza mostrarse a partir del 2006, la expansión del fenómeno ICU adopta la trama ortogonal del centro histórico de la ciudad con centro en la plaza de armas. Conforme se expande el fenómeno adopta la trama irregular de la ciudad, que contiene calles estrechas y sinuosas, debido a la falta de planificación urbana; donde las manzanas de viviendas son irregulares y compuestas por construcciones altos en los que existe hacinamiento de la población.

Luego de estandarizar el IICU en la escala de 0 a 1, fueron reclasificados en 6 categorías de intensidad del ICU, siendo los siguientes: 1) Nulo, de 0 a 0.25; 2) Muy débil, de 0.25 a 0.35; 3) Débil, de 0.35 a 0.50; 4) Moderada, de 0.50 a 0.65; 5) Fuerte, de 0.65 a 0.75; y, 6) Muy fuerte de 0.75 a 1.

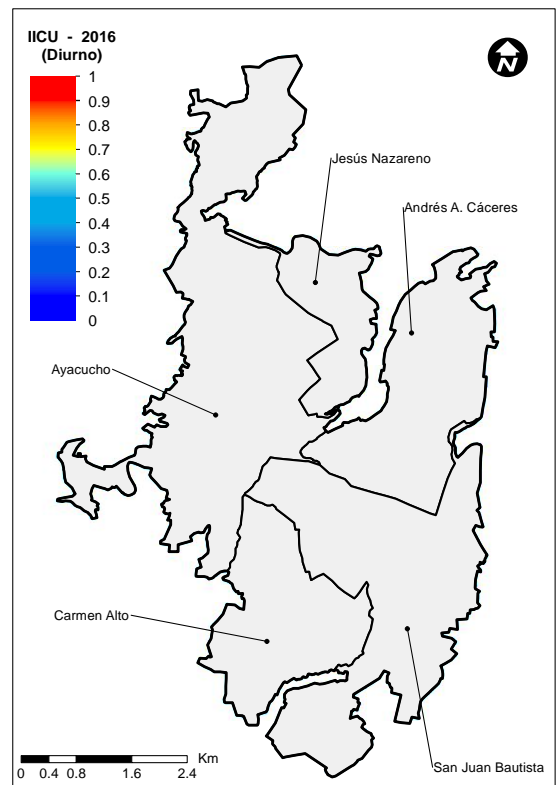
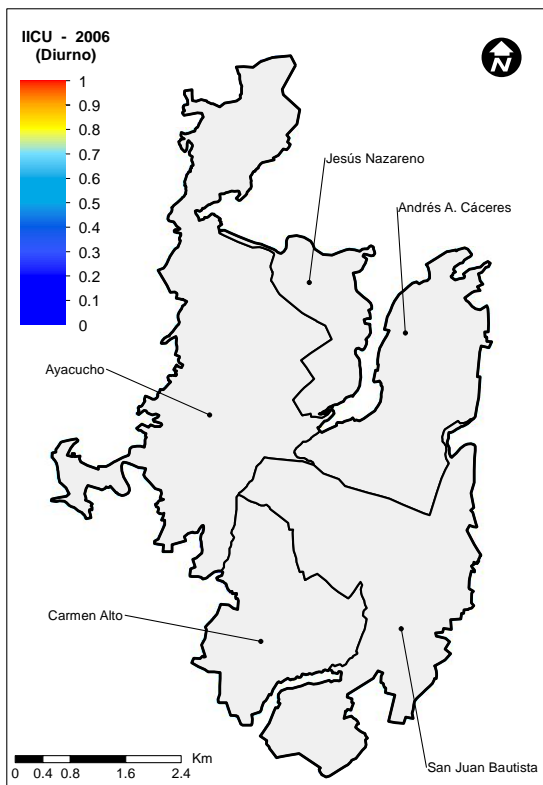
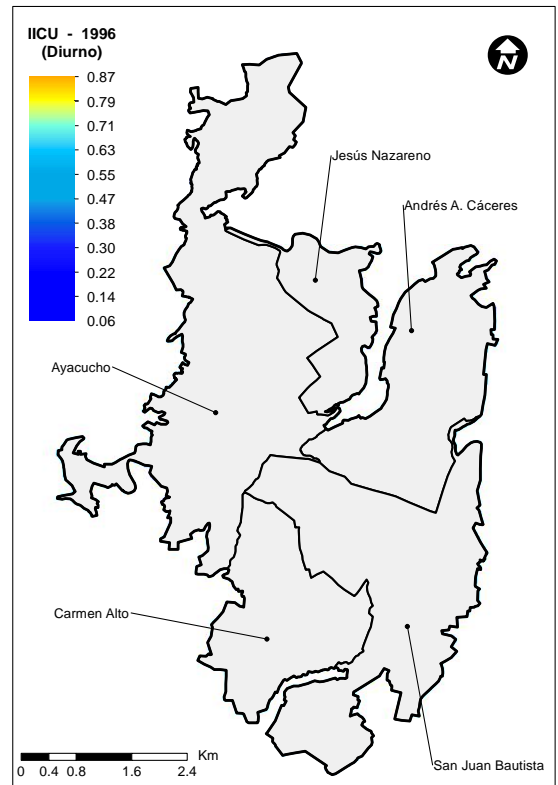
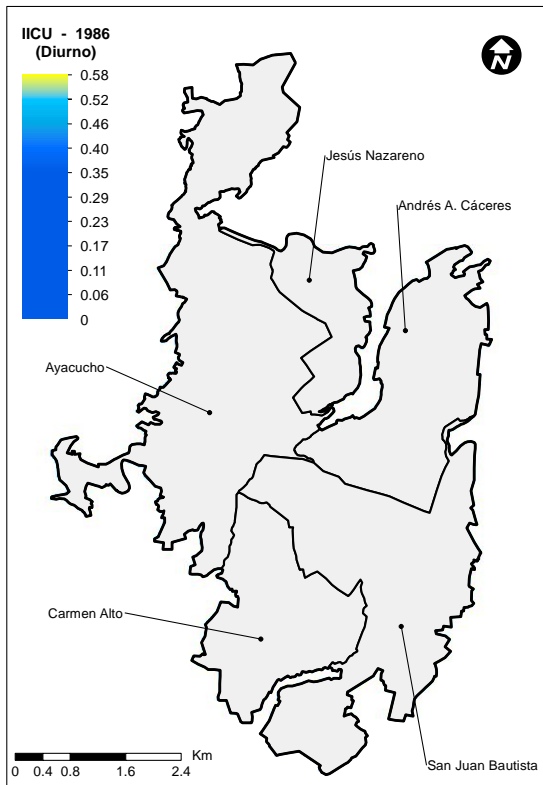


Ilustración 4.8: Índices de islas de calor urbano diurno de la ciudad de Ayacucho.

Para determinar los índices de ICU nocturno el procedimiento seguido ha sido similar, los resultados en mapas se muestra en la ilustraciones 4.9.

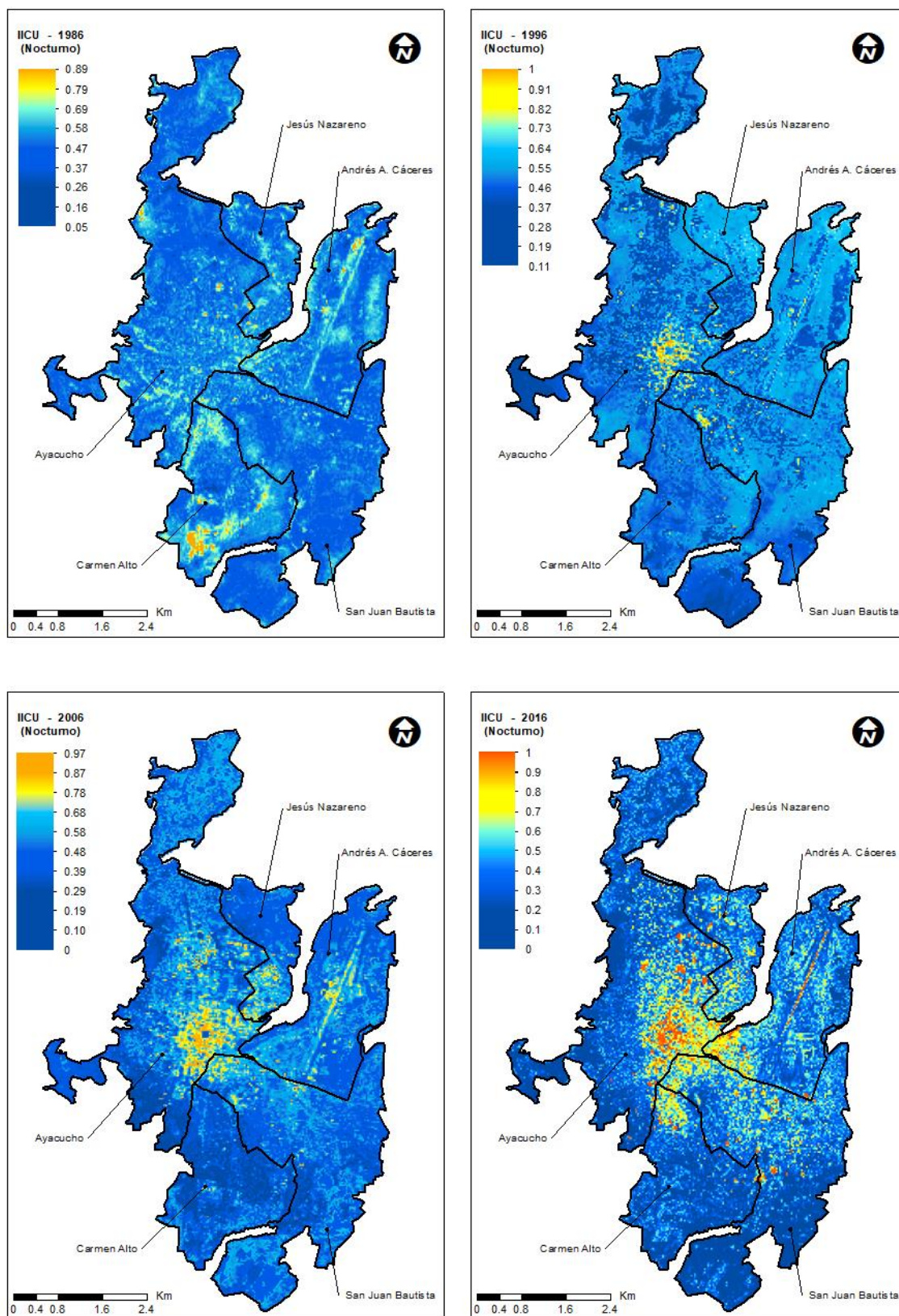


Ilustración 4.9: Índices de islas de calor urbana nocturno de la ciudad Ayacucho.

4.3. Caracterización espacial y temporal del fenómeno de ICU

4.3.1. Variabilidad temporal del ICU

Para identificar la dinámica temporal del ICU se realizó mediante una comparación visual de los mapas elaborados para cada periodo, determinando que entre el año 1986 y el 2016 se aprecia un cambio importante en la configuración del clima urbano. En el mapa correspondiente al año 2016, comparado con el de 1986 y 1996, se distinguen clara formación de focos de calor que en el mapa aparecen representados en color naranja a rojo intenso. Por otra parte, se observa que estos focos irradian calor en forma radiocéntrica.

En el mapa de 1986 se distingue una mancha de color amarillo sobre el área denominado centro histórico de Ayacucho, la plaza de Armas y viviendas coloniales de alrededores, esta mancha de calor se extiende en 1996 siguiendo un patrón similar a la expansión del área zona urbana; sin embargo, pese a tales evidencias se determina la ausencia del fenómeno de isla de calor superficial (ICUs) como un fenómeno que cambian las condiciones climáticas y ambientales al interior de la ciudad, las manchas de calor identificados para estos dos periodos es la denominada isla de calor atmosférica (ICUa).

Por tanto, en el periodo de estudio se identifica la ocurrencia de dos tipos de islas de calor urbana, la primera es la denominada ICUa que se refiere a la diferencia en la temperatura del aire entre la zona urbana y la rural circundante, en el estudio este fenómeno ocurre en los periodos anteriores al 2006; la segunda es la llamada ICUs, que es igual al anterior, pero la diferencia es entre los valores térmicos de los materiales urbanos (pavimento, pistas, techo, etc.) con respecto a superficies naturales con vegetación y demás coberturas naturales.

Para el 2006 se identifica como el inicio de formación del fenómeno ICUs como tal, los focos de calor se ubican en zonas donde en periodos anteriores se identificaron el fenómeno de ICUa. Finalmente, para el 2016 la evolución del

fenómeno ICUs es más claro y su tendencia es al aumento, su expansión al parecer se correlaciona con el desarrollo de la morfología y la expansión urbana.

La Isla de Calor se genera por el desarrollo de los centros urbanos y los cambios en las propiedades térmicas e irradiancias de su infraestructura, a diferencia del calentamiento global, la ICUs son cambios climáticos locales y no globales y sus efectos se limitan a una escala mucho menor, pero los efectos de ambos fenómenos son similares ya que pueden inducir a mayor consumo energético, afecta la salud y perjudica los elementos ambientales de un determinado lugar.

Para analizar la evolución temporal del ICUs en forma cuantitativa se comparan la frecuencia de píxeles con datos de promedio, además del límite inferior, medio y superior del índice; observándose que la frecuencia de píxeles que representan al límite alto del índice (0.66 a 1) y medio (0.33 a 0.66) aumenta sustancialmente a partir del 2006, mientras el límite bajo (0 a 0.33) presentan una variación negativa. Es decir, el clima urbano empieza a experimentar un cambio importante a partir del 2006, y su tendencia va en aumento.

Los cambios que registra la ciudad antes de 2006 muestran tendencia negativa a excepción del límite comprendido entre 0 y 0.33, la cual se comporta contraria a los demás rangos del índice, el aumento del índice en este rango refleja la variación del fenómeno ICUa, es decir, en 1986 y 1996 el clima urbano obedece a las variaciones climáticas de la zona y más no se trata de un fenómeno ambiental producto de la aglomeración urbana.

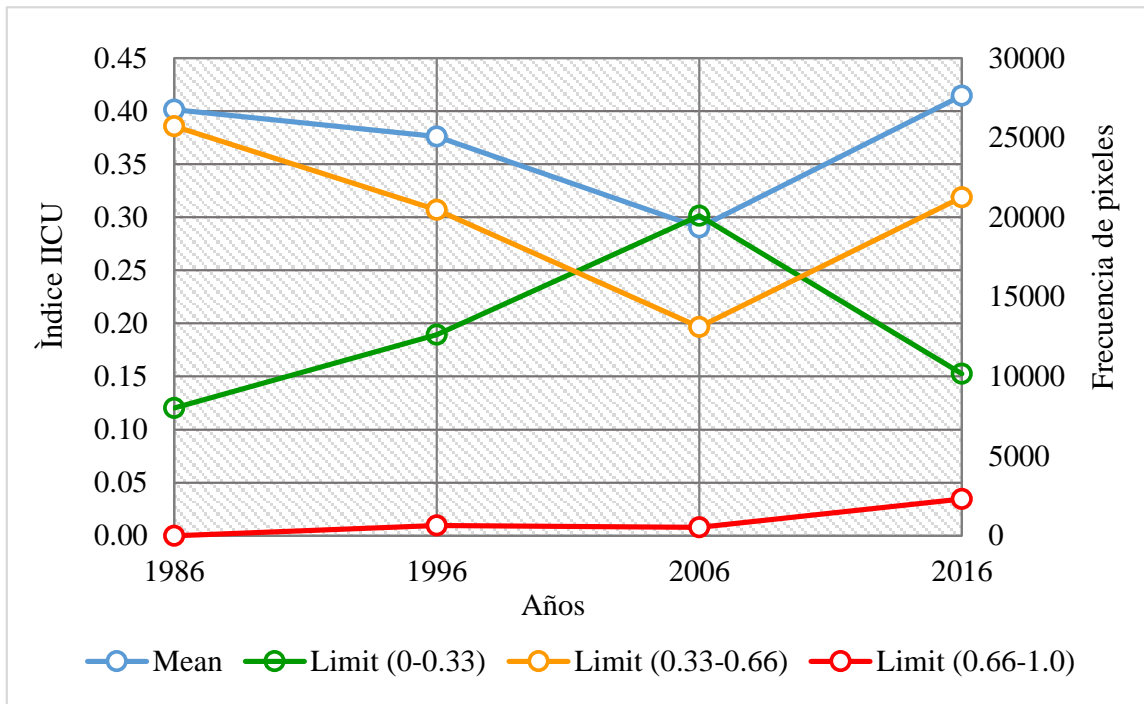


Ilustración 4.10: Variación temporal del ICU diurno promedio y límites de rango.

Con cuanto a la categoría de ICU diurno, las intensidades Muy fuerte, Fuerte y Moderada van en aumento a partir del 2006; las categorías de ICU Nulo y Muy débil, los espacios frescos, no muestran una clara estabilidad y ambas categorías se correlacionan negativamente; es decir, cuando el ICU Nulo aumenta, el ICU Muy débil tiende a disminuir o viceversa, solamente mostrando equilibrio en el 2006.

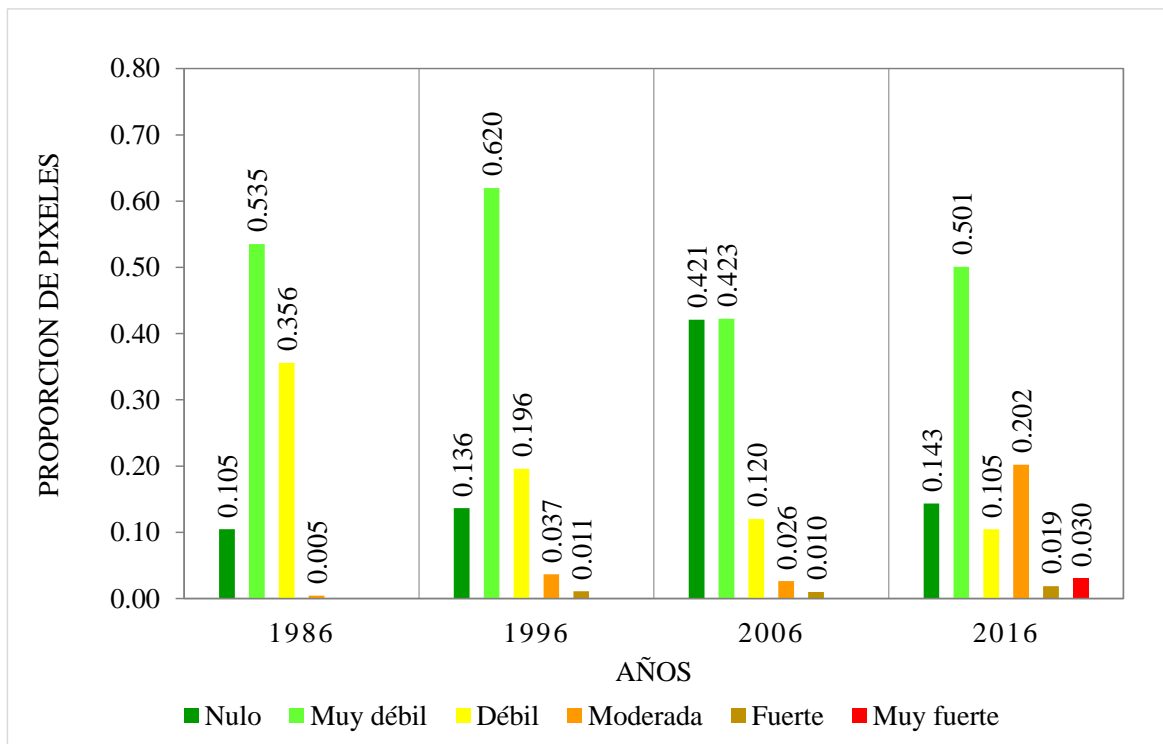


Ilustración 4.11: Variación temporal de categorías de ICU diurno.

También el ICU nocturno va en aumento en el rango bajo, medio y en los promedios, sobre la base de estas tendencias positivas se corrobora la generación del fenómeno ICUs a partir del 2006, puesto que los focos de ICU diurno mantienen gradientes de calor durante la noche a diferencia del ICUa observado en 1986 y 1996, donde las áreas de calor diurno empiezan a difuminarse simultáneamente en toda la zona urbana hasta alcanzar un equilibrio con la temperatura ambiental antes de la media noche. En el análisis correspondiente al 2016 se encontró que los focos de calor permanecen mayor tiempo durante la noche, y en determinadas zonas la tendencia tiende volverse en permanente, contrayéndose solamente hacia el centro del foco generando espacios con gradientes de calor claramente diferenciados.

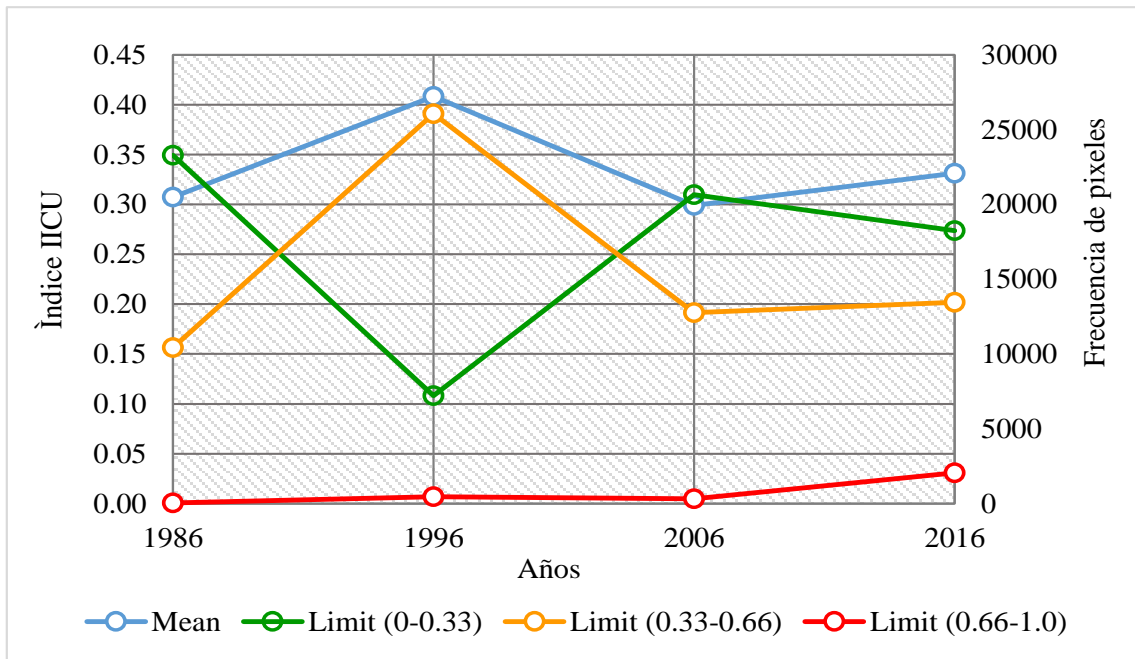


Ilustración 4.12: Variación temporal del IICU nocturno promedio y límites de rango.

Las categorías de ICU nocturno se comportan de manera similar que el ICU diurno, la intensidad Muy fuerte, Fuerte y Moderada muestran aumento a partir del 2006; mientras la categoría Muy débil se reduce favoreciendo el aumento de la categoría Nulo, esta situación se debe a la influencia de la temperatura ambiental que enfría el espacio urbano desde las periferias.

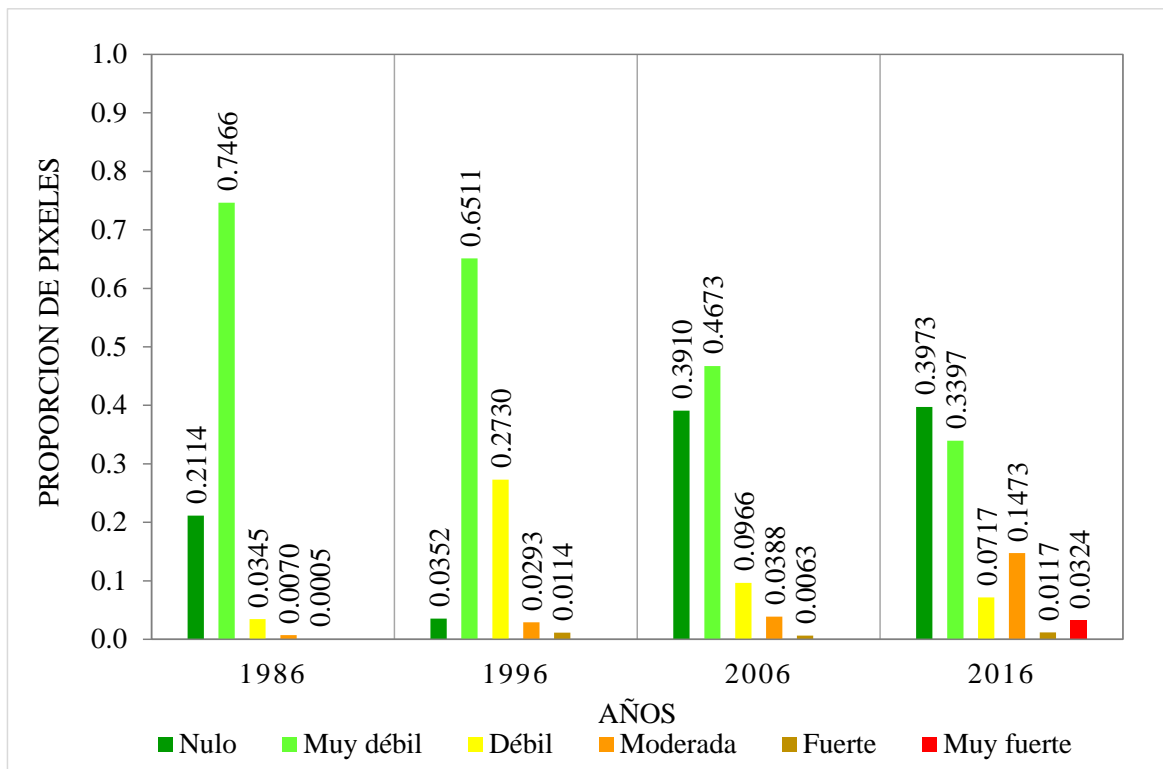


Ilustración 4.13: Variación temporal de categorías de IICU nocturno.

En conclusión, se determina un cambio considerable del clima urbano a partir del 2006 y su tendencia va en aumento, también se observa cambios antes del 2006 pero dichos cambios están más correlacionados a las condiciones ambientales que con las causas que generan el fenómeno de ICU, situación que también se puede observar en la asociación de los factores sintéticos del APC.

En el año 1986 y 1996, la dinámica temporal del ICUa es débil o inexistente durante el día y la máxima intensidad ocurre durante la noche. Mientras, el ICUs sobre todo en el 2016 se mantiene durante el día y la noche, la máxima intensidad ocurre durante el día y se contrae en la noche en dirección del centro del foco de calor creando gradientes de calor claramente diferenciados.

Según Fernández et al (2016), el ICUa es un fenómeno que se presenta al atardecer y su prevalencia importante es la noche, porque el calor acumulado en el asfalto, viviendas y otras superficies impermeables son devueltos a la atmósfera en forma de radiación de onda larga; en el día la mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos y las sombras producidas por los viviendas mantienen la ciudad más fría que los alrededores. Ello explica que el ICUa diurna, para los años 1986 y 1996 sea menos intensa que en la nocturna.

En el ICUs, la temperatura de la superficie es más sensible a las características del suelo urbano y en consecuencia se produce una mayor variabilidad espacial y temporal entre el día y la noche. La ICUs no está influida directamente por los flujos de aire desde áreas más cálidas a las más frías, que regulan la temperatura del aire de las ciudades, por lo que con la ICUs los gradientes térmicos son más marcados. El fenómeno de ICUs se caracteriza fundamentalmente por tres parámetros que son: su intensidad, su forma y la localización del máximo térmico o focos de calor.

4.3.2. Distribución espacial del ICU

Como una ayuda para caracterizar la distribución espacial del fenómeno ICU, se ha aplicado el test no-paramétrico de Mann-Kendall en su versión monotónica y la estimación TSen de tasa de cambio, determinando la tendencia y su significancia espaciotemporal. El test se aplicó a todas las series diurnas y nocturnas, estimando la presencia de tendencia y su significación estadística que se muestra en mapas en la ilustración 4.14.

El mapa de pendiente Theil-Sen, con un nivel de confianza al 90%, permitió rechazar la hipótesis nula (no hay una tendencia en la serie) y se acepta la hipótesis alternativa, es decir queda demostrado la existencia de una tendencia del fenómeno ICU en la serie temporal analizada. En dicha mapa las zonas con tendencia positivas se representan de color naranja a rojo oscuro, mientras las zonas que no muestran tendencia alguna aparecen de color clara, y por último el color azul señala a la zonas con tendencia negativa.

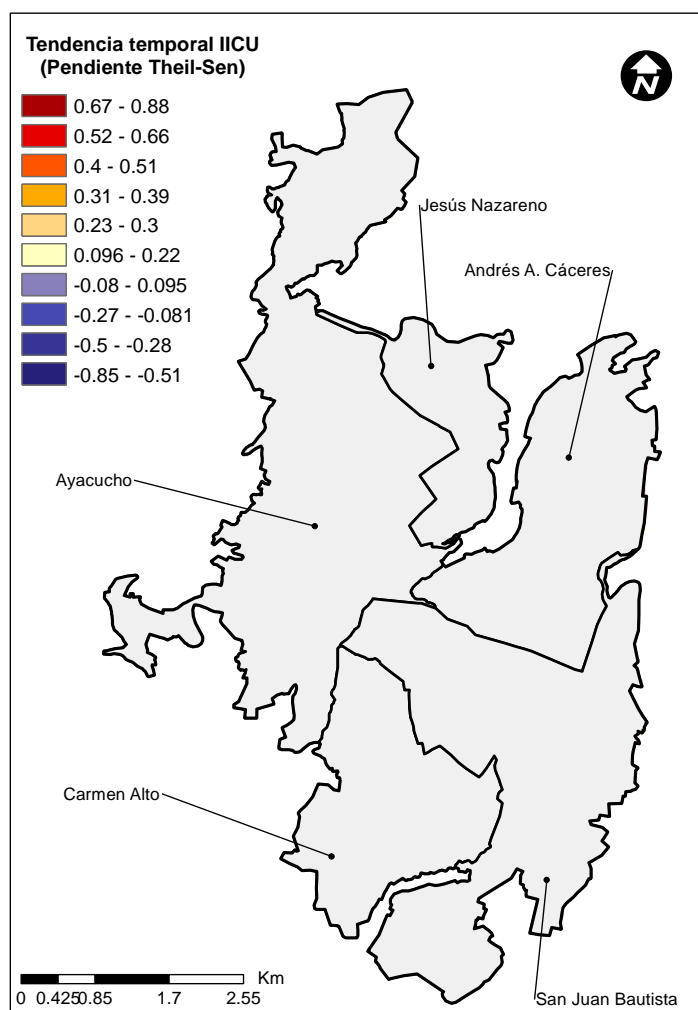


Ilustración 4.14: Mapa de tendencia monótona de IICU, test de Mann-Kendall.

En general, la distribución espacial del ICU es radiocéntrica a su foco de calor y también a la configuración urbana, el ICU se irradia en forma e intensidad desde el centro de la ciudad hacia la periferia, con intensidad baja en el centro histórico de Huamanga y también en las periferias. Para los años 1986 y 1996 el fenómeno de ICUa se distribuye en el centro histórico de Huamanga, irradiándose en 1996 hacia el extremo Oeste del distrito de San Juan Bautista y también al extremo Suroeste del actual distrito de Jesús Nazareno, en forma similar se comporta el IICU nocturna (Ver ilustraciones 4.15 y 4.16).

Para el periodo 2006, el ICU es más notoria y aumenta en las zonas mencionadas para 1999. En el 2006 el ICU es más notoria al rededor del centro histórico y como nueva zona se expande levemente hacia la zona Norte, conocido como el sector de Emadi. En el distrito de San Juan Bautista, se expande levemente hacia

la zona Este, adyacentes de la avenida Ramón Castilla y del puente nuevo. En el distrito de Jesús Nazareno, el ICU se expande hacia la zona Norte.

En el 2016, el ICU se hace más evidente como un fenómeno ambiental propiamente dicho, los espacios que muestran este fenómeno en periodos anteriores al parecer inician a consolidarse, expandiéndose hacia la zona Norte del distrito de Ayacucho y de Jesús Nazareno, zona Este y Sureste en el distrito de San Juan, extremo Suroeste del actual distrito Andrés Avelino Cáceres; mientras en el distrito de Carmen Alto, se evidencia en el extremo Norte, límite con el distrito de Ayacucho.

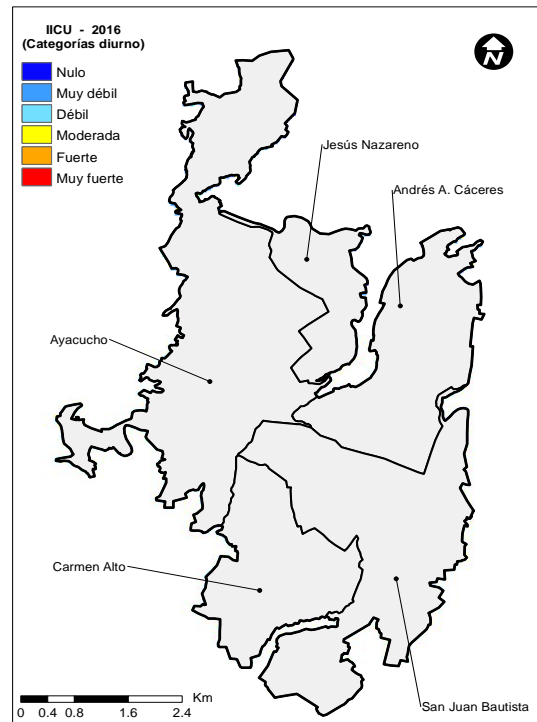
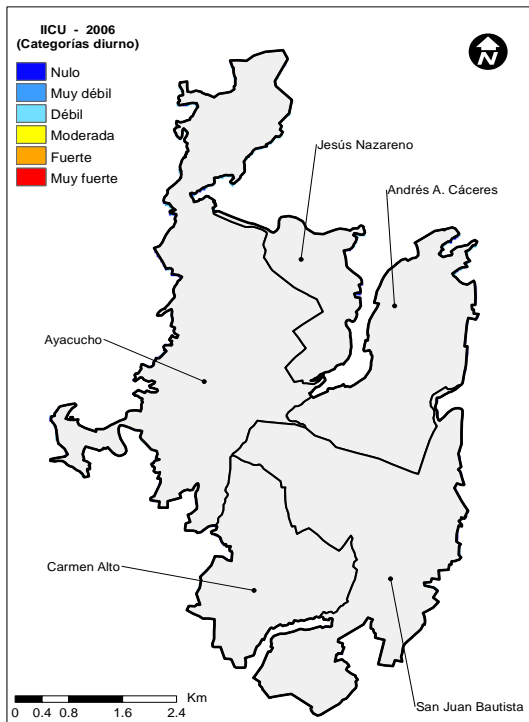
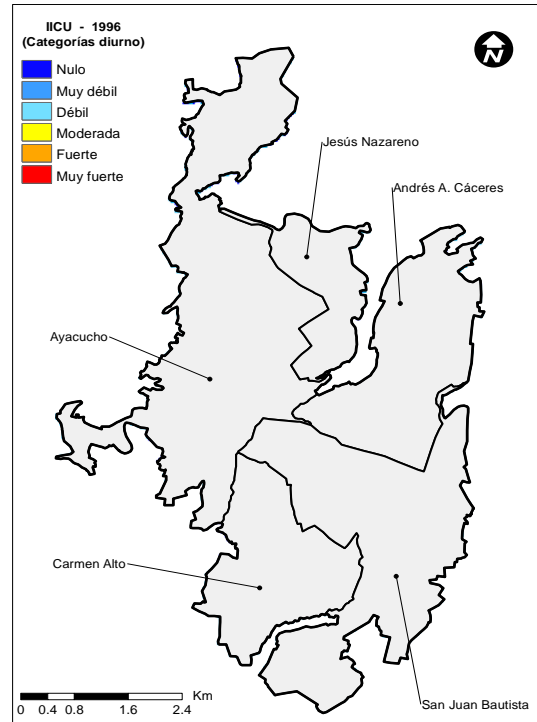
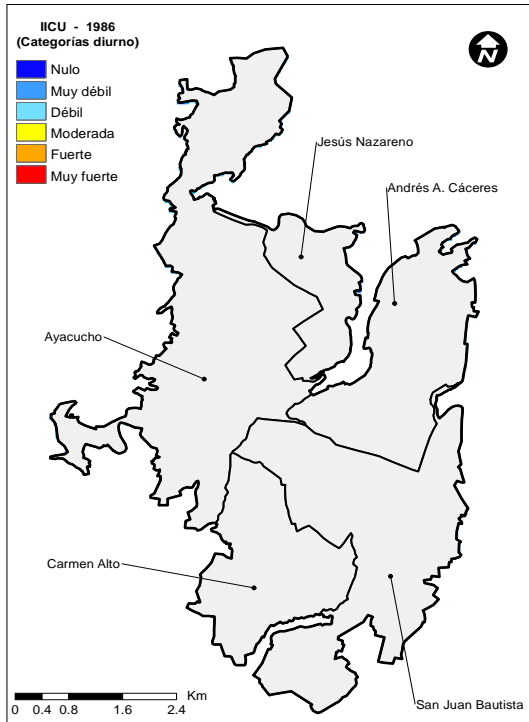


Ilustración 4.15: Índice ICU diurno rescalado en categorías de intensidad.

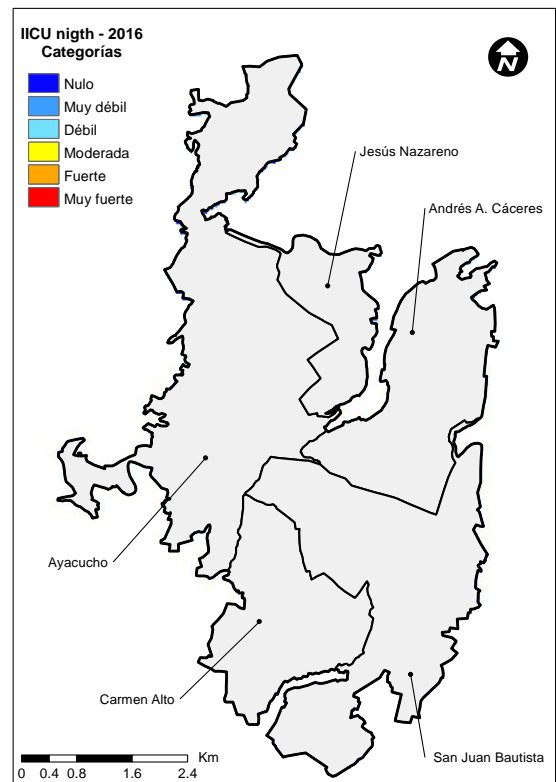
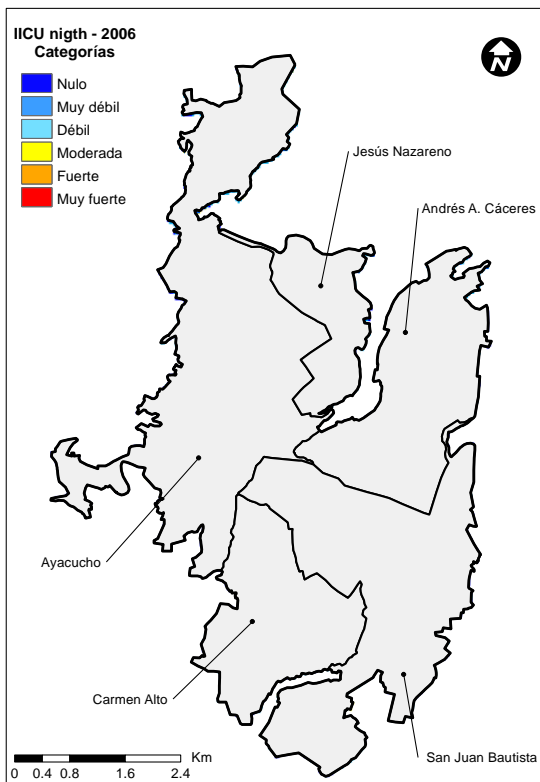
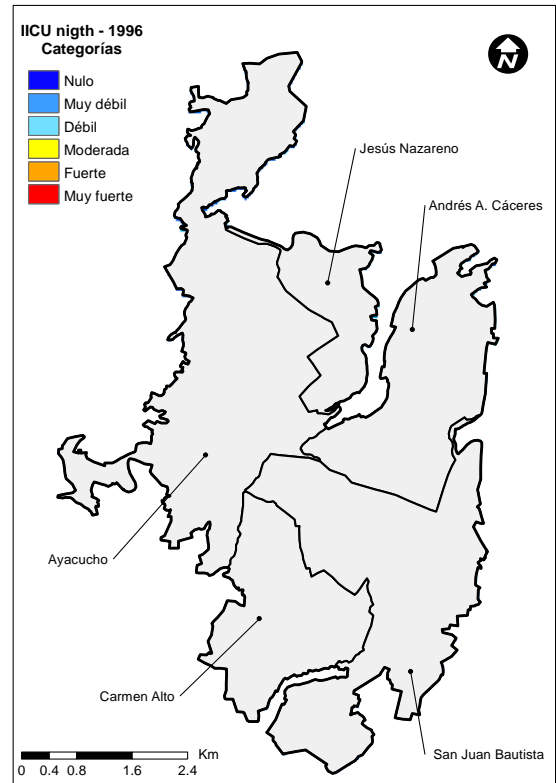
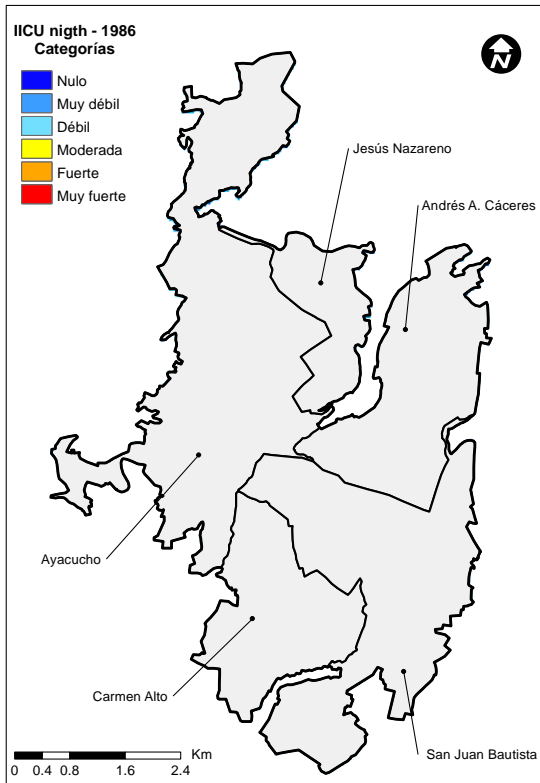


Ilustración 4.16: Índice ICU nocturno rescalado en categorías de intensidad.

En las series de ICU diurno y el ICU nocturno, para los años 1986 y 1996 el fenómeno ICUa presenta poca variabilidad y se distribuye uniformemente en la zona urbana, no existiendo focos demasiados fríos ni tampoco demasiado calientes, las superficies que se calientan en el día se enfrían paulatinamente durante la noche, alcanzado un equilibrio con la temperatura ambiental al aproximarse a la media noche.

A partir del 2006 los cambios son más visibles y el fenómeno ICUs se genera en zonas próximas al centro de la ciudad, sin embargo los focos de calor son débiles y poco diferenciado a comparación del 2016, en este último la localización de las zonas de máximo térmico son fáciles de identificar y a su alrededor genera un determinado gradiente térmico. El grado de vecindad y la densidad de estos focos de calor configuran islas térmicas más pronunciadas y permanentes, al parecer estos espacios críticos están iniciando a formarse en la ciudad de Ayacucho y estamos a tiempo de implementar medidas de mitigación encaminada a desarrollar una ciudad sostenible.

En el mapa correspondiente al 2016, los espacios críticos de ICU abarca las zonas límites entre los distritos de Ayacucho, Jesús Nazareno, San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; en segundo lugar constituye la zona límite del distrito de San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; por último la zona límite del distrito de San Juan Bautista y Carmen alto.

Al interior de cada distrito la distribución del ICU también es variada en forma, intensidad y localización; los espacios críticos se identifican en la zona Suroeste y Norte del distrito de Ayacucho, la zona centro del distrito de San Juan Bautista, la zona Sur y Norte del distrito de Jesús Nazareno, y la zona Norte del distrito de Carmen Alto.

Asimismo, la distribución de las categorías de ICU en el distrito depende de la localización del punto de máximo térmico, de la trama urbana y del cambio de usos del suelo; otra característica es que la tendencia en los gradientes considerados Moderada, Fuerte y Muy Fuerte van en aumento.

En la ilustración 4.17, se observa que la categoría Nula es mucho mayor (33.2%) en Carmen Alto, distrito caracterizado por muy baja densidad de construcciones, amplios espacios libres, buena vegetación, geomorfología favorable para la circulación del aire y la ventilación de espacios públicos; en los demás distritos la proporción del territorio con esta categoría no presenta diferencia significativa.

Las categorías muy débil y débil se distribuyen en proporciones similares en los 5 distritos, excepto en el distrito de Carmen Alto la categoría débil es mucho menor (8.9%). Por último, la mayor variabilidad se observa a partir de la categoría moderada, siendo Ayacucho, el distrito que presenta mayores áreas: 9.5% en la categoría moderada, 2.1% en la categoría fuerte y 1.6% en la categoría muy fuerte.

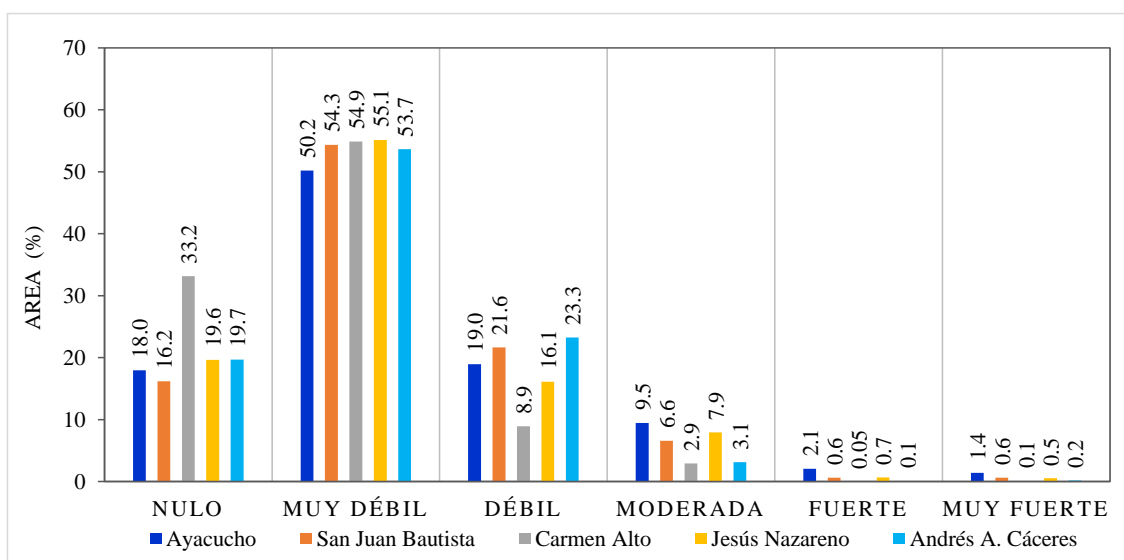


Ilustración 4.17: Distribución espacial de categorías de ICU diurno.

En las Ilustraciones 4.18 al 4.21, se muestra la distribución espacial de ICU diurno para cada periodo del estudio, donde la influencia de una determinada categoría de ICU está expresada en hectáreas del territorio distrital.

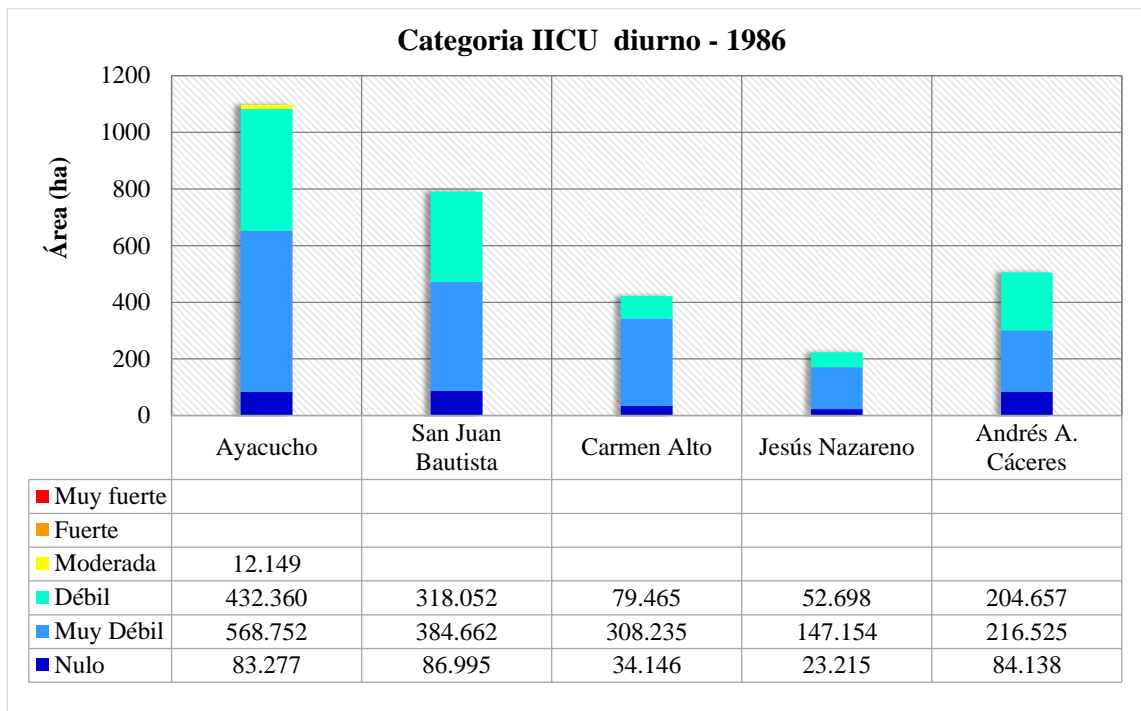


Ilustración 4.18: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1986.

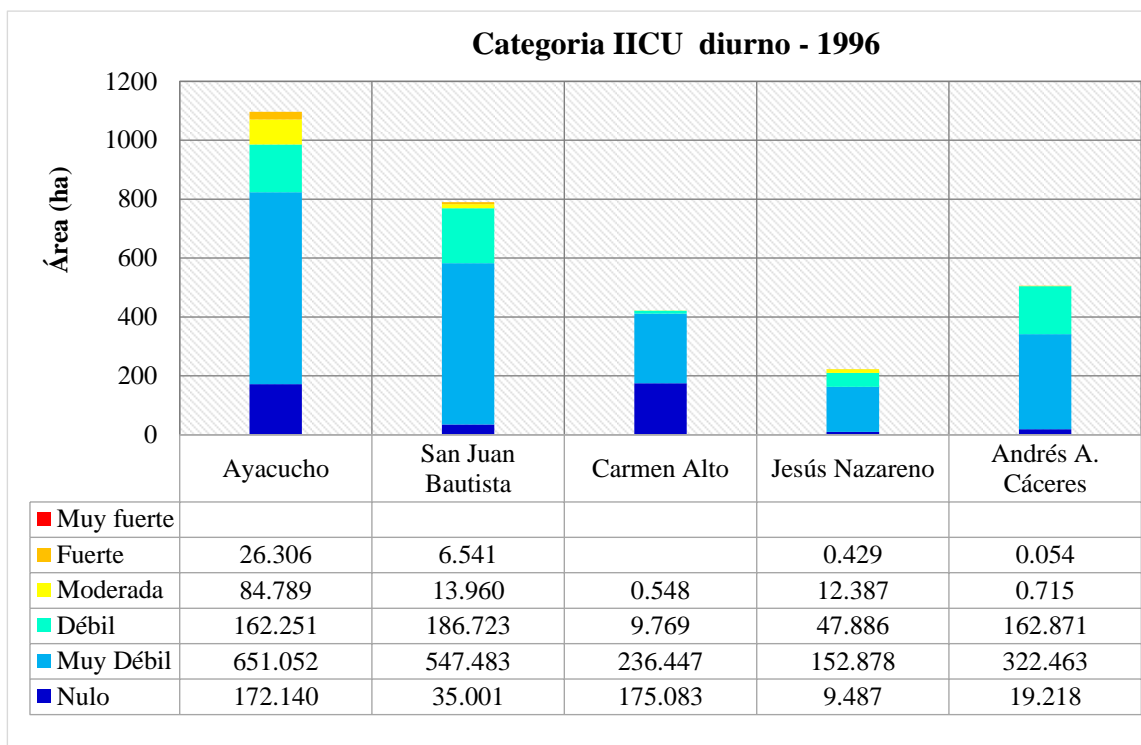


Ilustración 4.19: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1996.

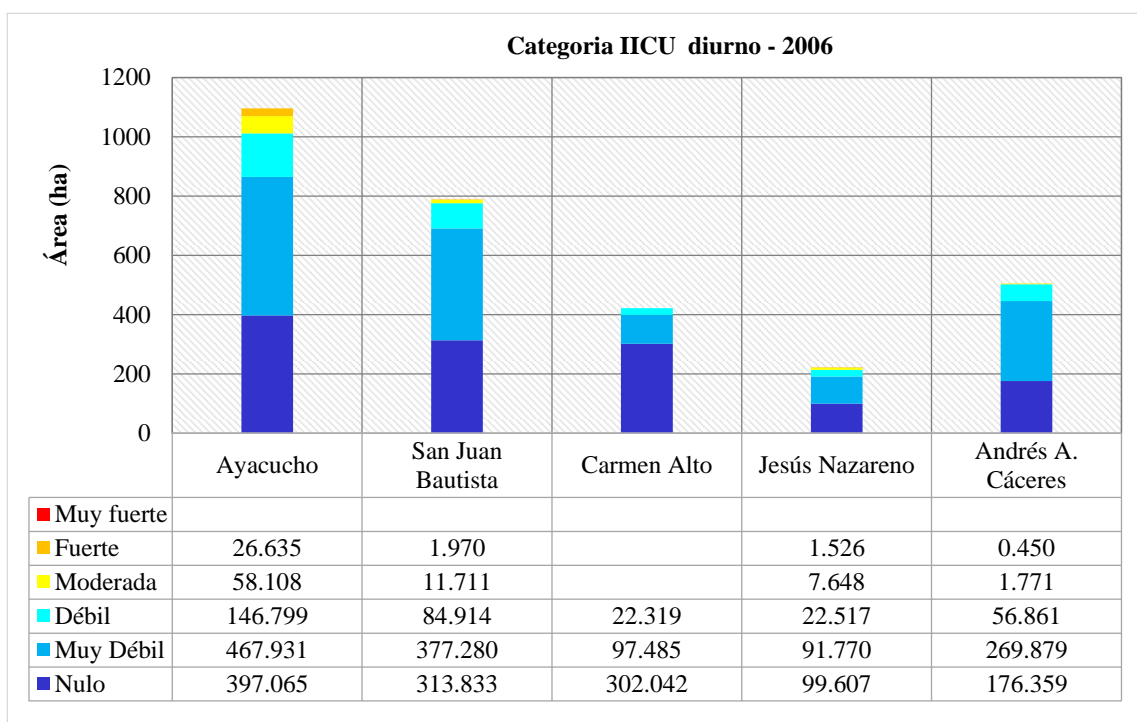


Ilustración 4.20: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2006.

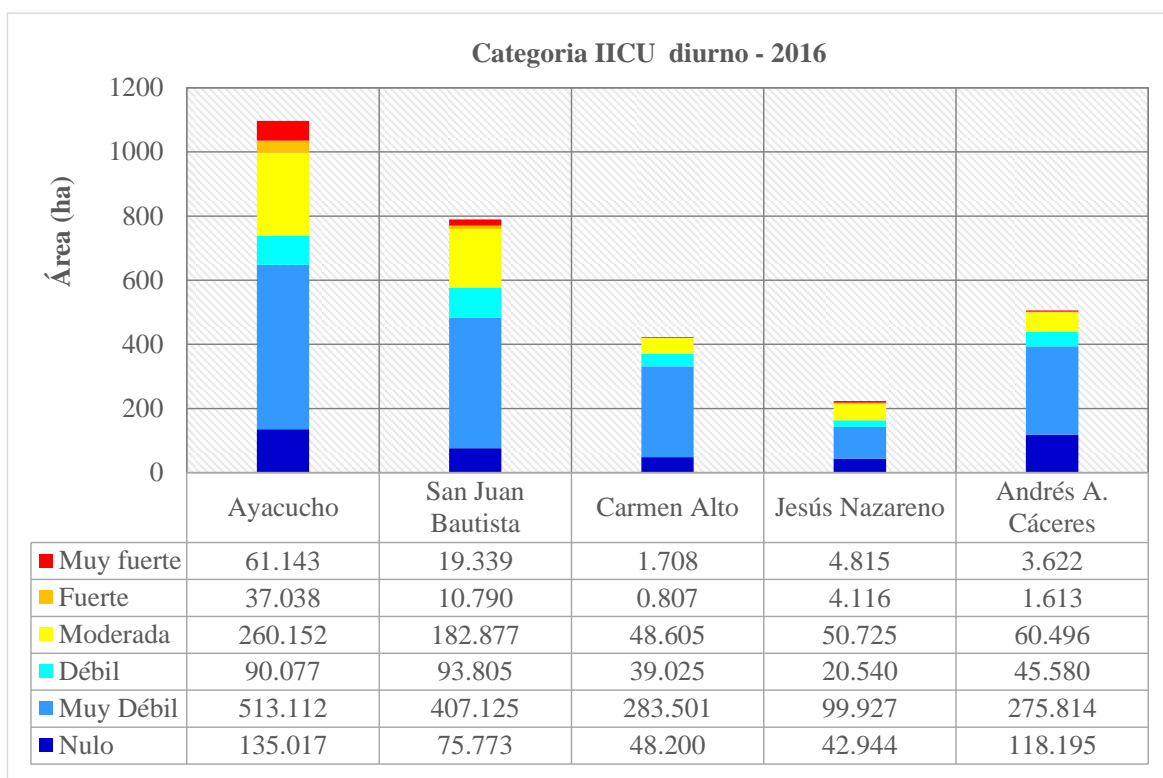


Ilustración 4.21: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.

La distribución espacial del ICU nocturna (Ilustración 4.22) es similar al observado en el ICU diurno, aunque las áreas ocupadas por las categorías moderada, fuerte y muy fuerte es sustancialmente menor que en el ICU diurno.

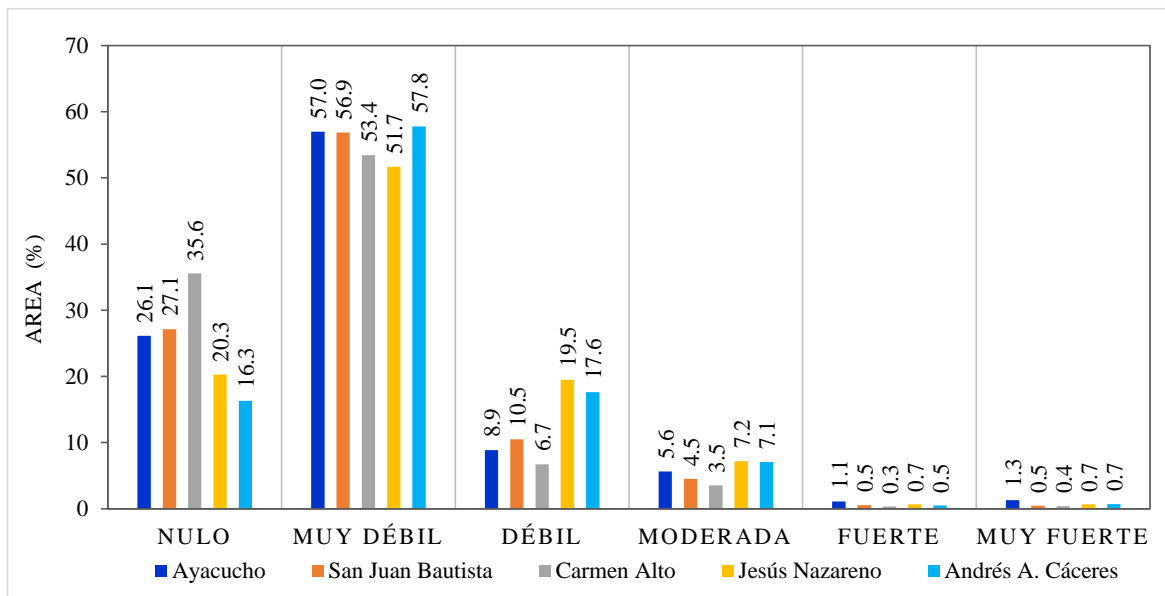


Ilustración 4.22: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.

La distribución espacial de categorías de ICU nocturno, expresado en hectáreas de territorio distrital, para cada periodo del estudio se muestra en los siguientes gráficos.

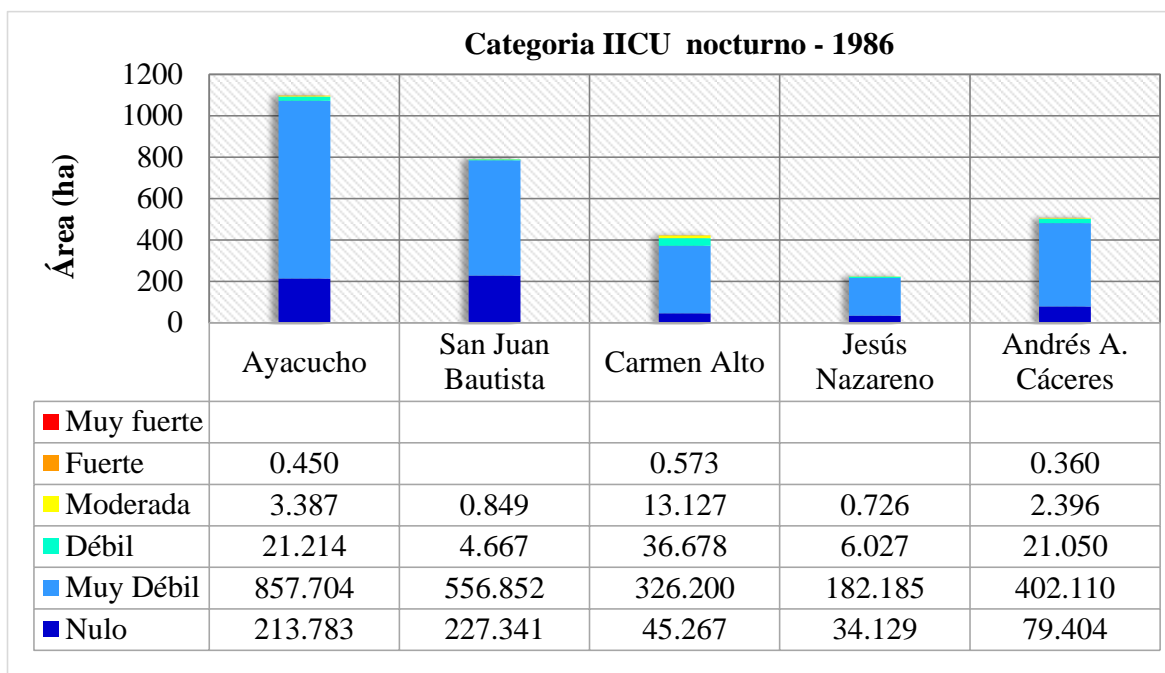


Ilustración 4.23: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1986.

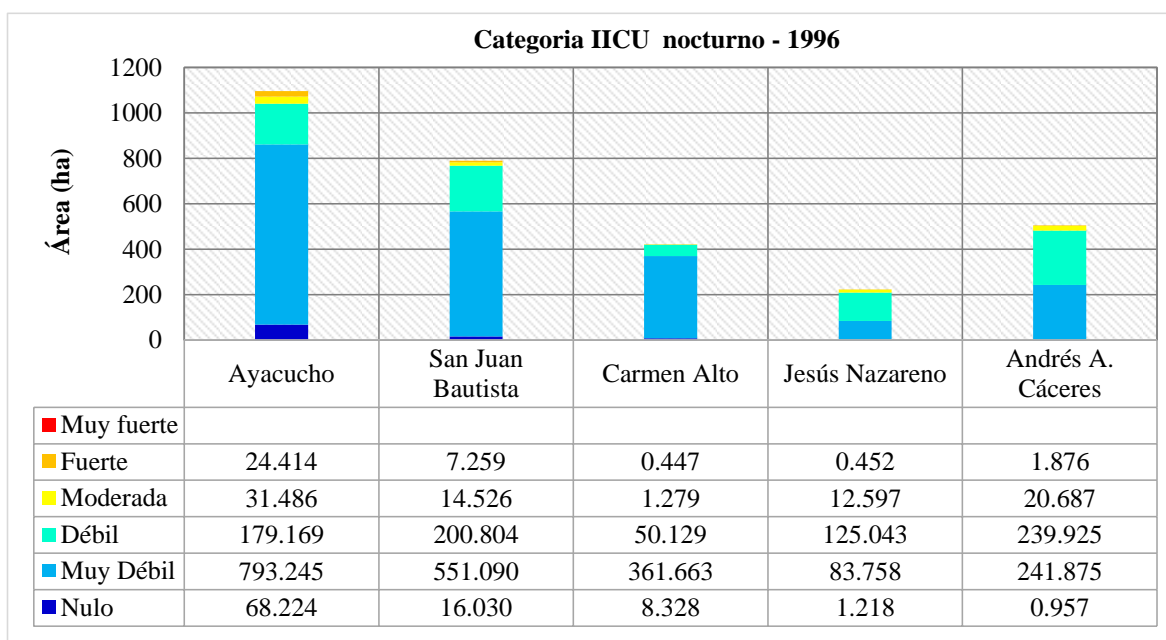


Ilustración 4.24: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1996.

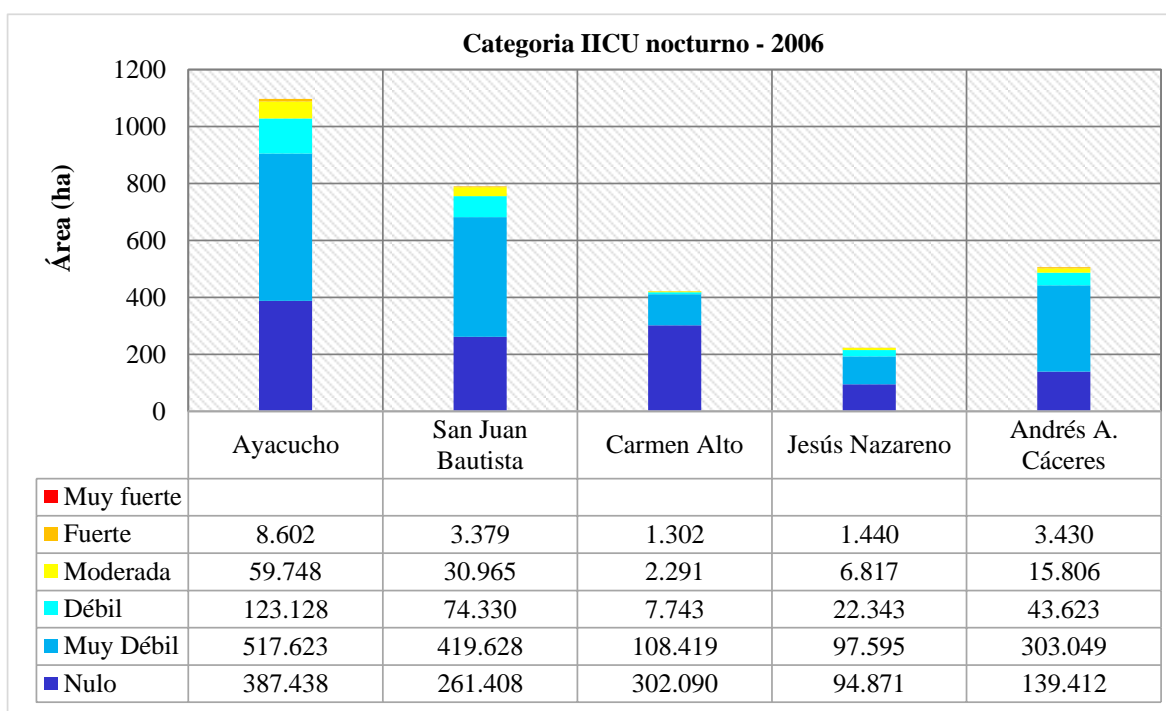


Ilustración 4.25: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2006.

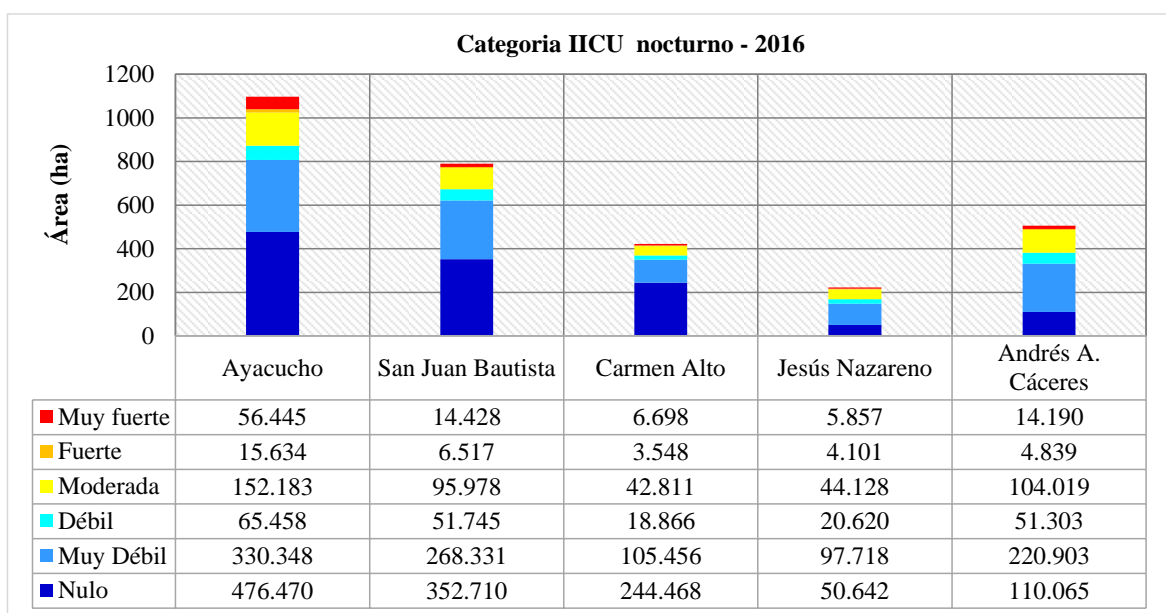


Ilustración 4.26: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2016.

4.3.3. Jerarquización de distritos según el ICU

La agrupación de los distritos por la intensidad de ICU se realizó mediante el análisis de conglomerados jerárquico, utilizando los valores promedios de ICU diurno y nocturna, los resultados de formación de la estructura jerárquica se muestran mediante un dendrograma. Con esta clasificación los distritos se agrupan en 3 grupos de conglomerados y son: 1) Ayacucho y Jesús Nazareno, con mayores índices de ICU; 2) San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; y, 3) Carmen Alto, presenta bajo índice de ICU.

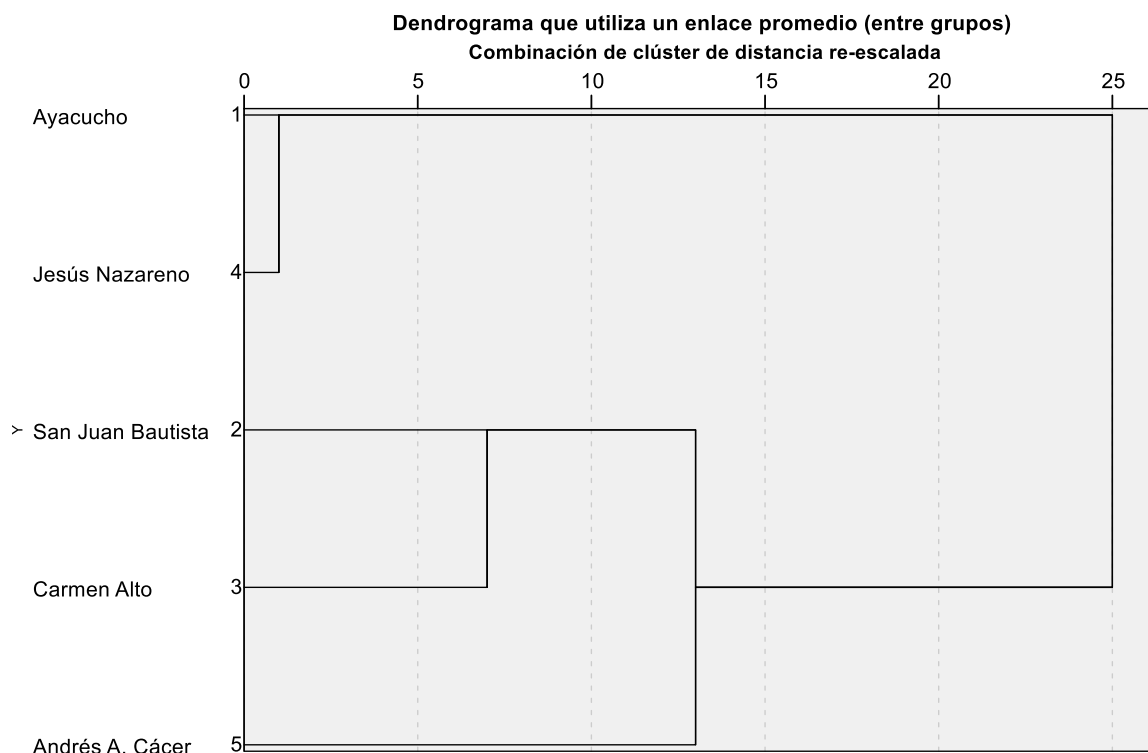


Ilustración 4.27: Dendrograma de la serie temporal de ICU diurno y nocturna.

4.4. Comportamiento de la temperatura superficial y crecimiento urbano

La isla de calor urbana superficial, tratado en este trabajo, corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y coberturas urbanos, generando la denominada temperatura de emisión superficial (T_s), las cuales después de obtener para cada periodo de estudio ha sido validado para utilizar en el análisis temporal y espacial.

Para la validación de T_s se ha comparado con datos de temperatura del aire (T_a) provenientes de estaciones meteorológicas y datos de T_s medidos In-situ, estos datos han sido interpolados para la hora de paso del satélite y se ha generado mapas continuos de T_s y T_a . Para los años 1986, 1996 y 2006, la T_s se ha generado utilizando información de temperaturas del aire (media, máxima y mínima), ingresando estos datos en el modelo de Partón junto con valores de biomasa y la radiación solar.

En la validación se obtienen coeficientes de determinación r^2 de la regresión lineal que varían entre 0.88 y 0.96, con este cálculo estadístico se determina que los mapas de temperatura de superficie son aceptables. Asimismo, la diferencia entre T_s y T_a varía entre 10°C y 18°C , lo cual es habitual según Sandholt et al. (2002). Las correlaciones entre la T_s medido en terreno y obtenido con imágenes de satélite para 1986 y 2016 se muestran en la Ilustración 4.28 y 4.29.

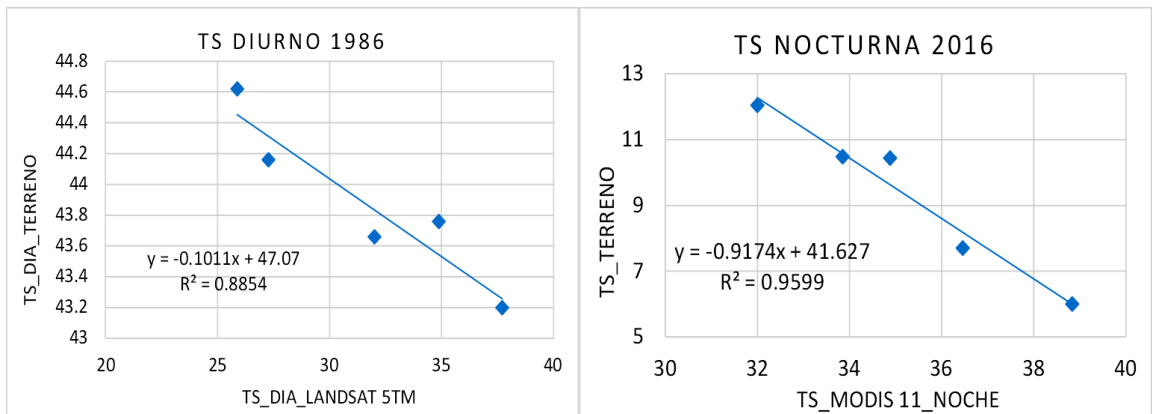


Ilustración 4.28: Coeficientes r^2 en validación de T_s para 1986 y 2016.

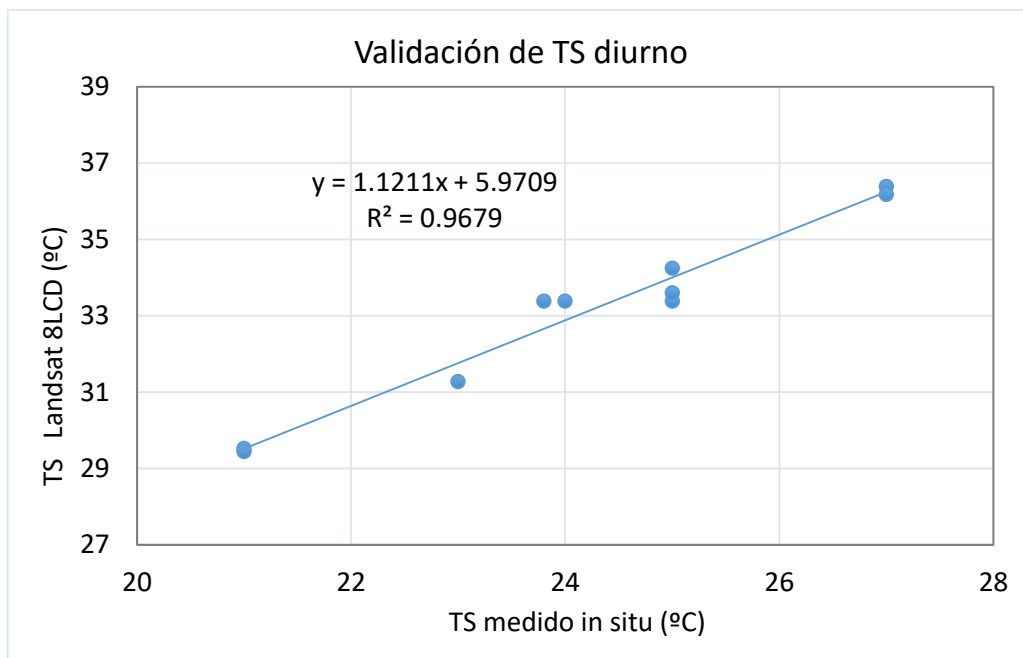


Ilustración 4.29: Coeficiente r^2 en validación de T_s medido in situ versus T_s Teledetectado para el 2016.

4.4.1. Patrones temporal y espacial de la temperatura superficial

4.4.1.1. Comportamiento temporal de la temperatura superficial

En las Ilustraciones 4.30 y 4.31 se muestra la evolución temporal de Ts diurna y nocturna para la ciudad de Ayacucho entre 1986 y el 2016, donde se puede observar que las temperaturas correspondientes a un año de escasa precipitación pluvial (1996), son superiores respecto a un año en donde se registra una buena precipitación (1986).

La variabilidad de Ts es más notoria en superficies desnudas respecto a otros que presentan cobertura vegetal y capa de suelo, por esta razón los espacios periféricos a la ciudad presentan Ts alto incluso mayor a las registradas en la zona céntrica de la ciudad; este comportamiento se observa principalmente en las zonas adyacentes al cerro de la Picota, la ciudad universitaria, cerro Acuchimay, adyacentes al aeropuerto, ciudad de las Américas, Santa Elena, Vista alegre y Chakihuaycco. En el 2006 y 2016, la Ts se configura dentro del área urbana, distinguiéndose áreas con mayor temperatura que luego originan las llamadas zonas de máximo térmico.

Al comparar los mapas con la línea de base (año 1986), se observa un incremento considerable de Ts máximo en 2006 y 2016, con 4.35°C y 13.43°C respectivamente. Además de su variabilidad temporal se observa un patrón de gradiente, con promedio de temperaturas más bajas para 1986 y medias para 1996, mientras las temperaturas altas se registran en 2016. Cabe resaltar, que al comparar con el SAVI y el MNDWI, en todos los periodos de estudio, las correlaciones resultan negativas y significativas, indicando que la reducción de la cobertura vegetal y la impermeabilización del suelo con el crecimiento urbano, provocan un aumento de Ts.

Según Fernández et al., 2016, la impermeabilización del suelo urbano genera una disminución de la evapotranspiración entre 30 y 40%, la exposición de superficies pavimentadas a la radiación solar directa y difusa corta el intercambio de calor (en sistema suelo-aire) producido en el proceso de evaporación, homogenizando la

superficie térmica causada por las islas de calor, traduciéndose en aumento de Ts.

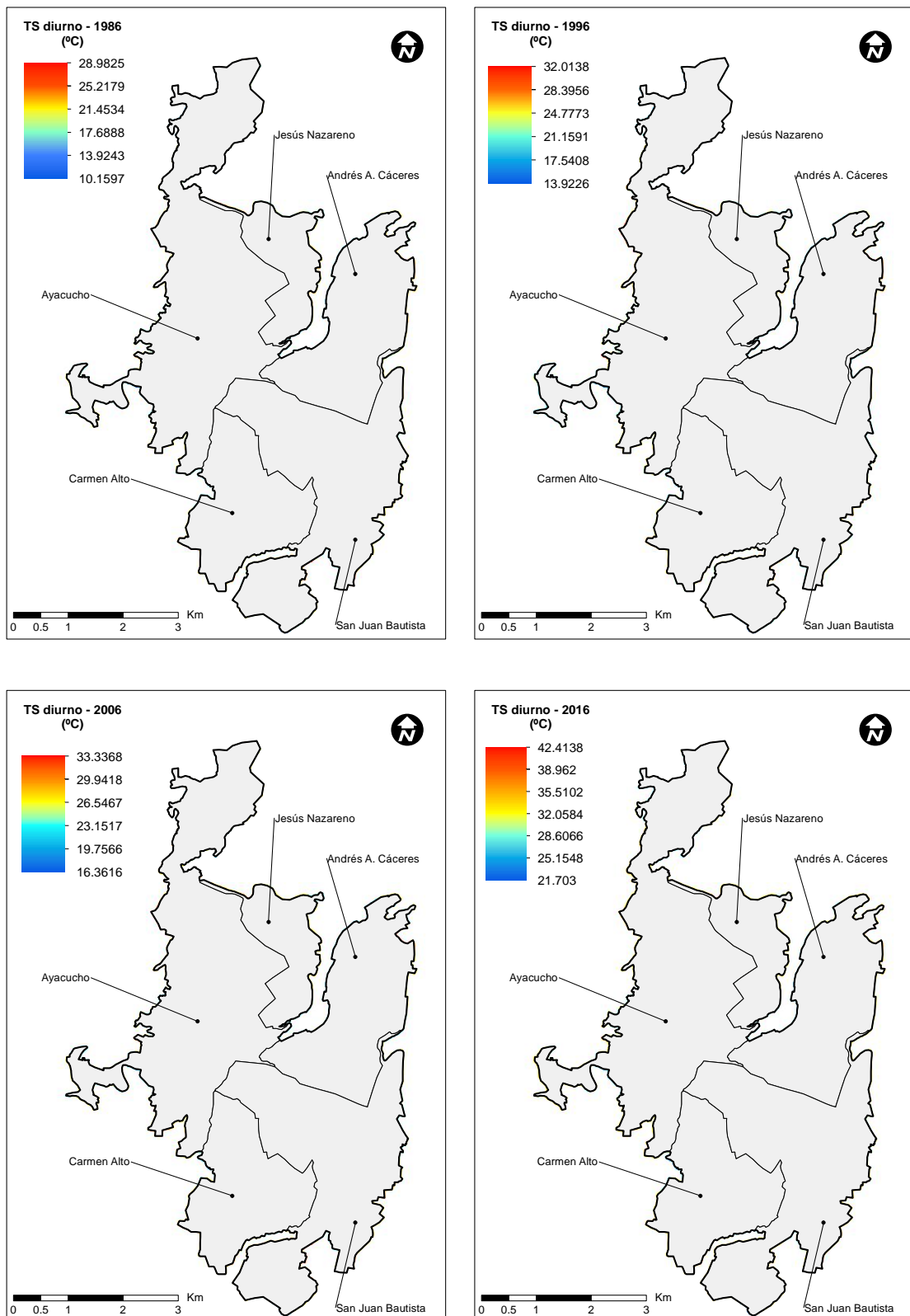


Ilustración 4.30: Serie temporal de TS diurno para el periodo 1986 a 2016.

La Ts nocturna muestra mayores valores en la zona céntrica de la ciudad, mientras en la periferia los valores de Ts son bajos. Asimismo, el aumento de Ts ocurre en zonas con densificación urbana y de construcciones principalmente en altura, provocando cambios importantes de Ts nocturna que es más notoria en el mapa correspondiente al 2016.

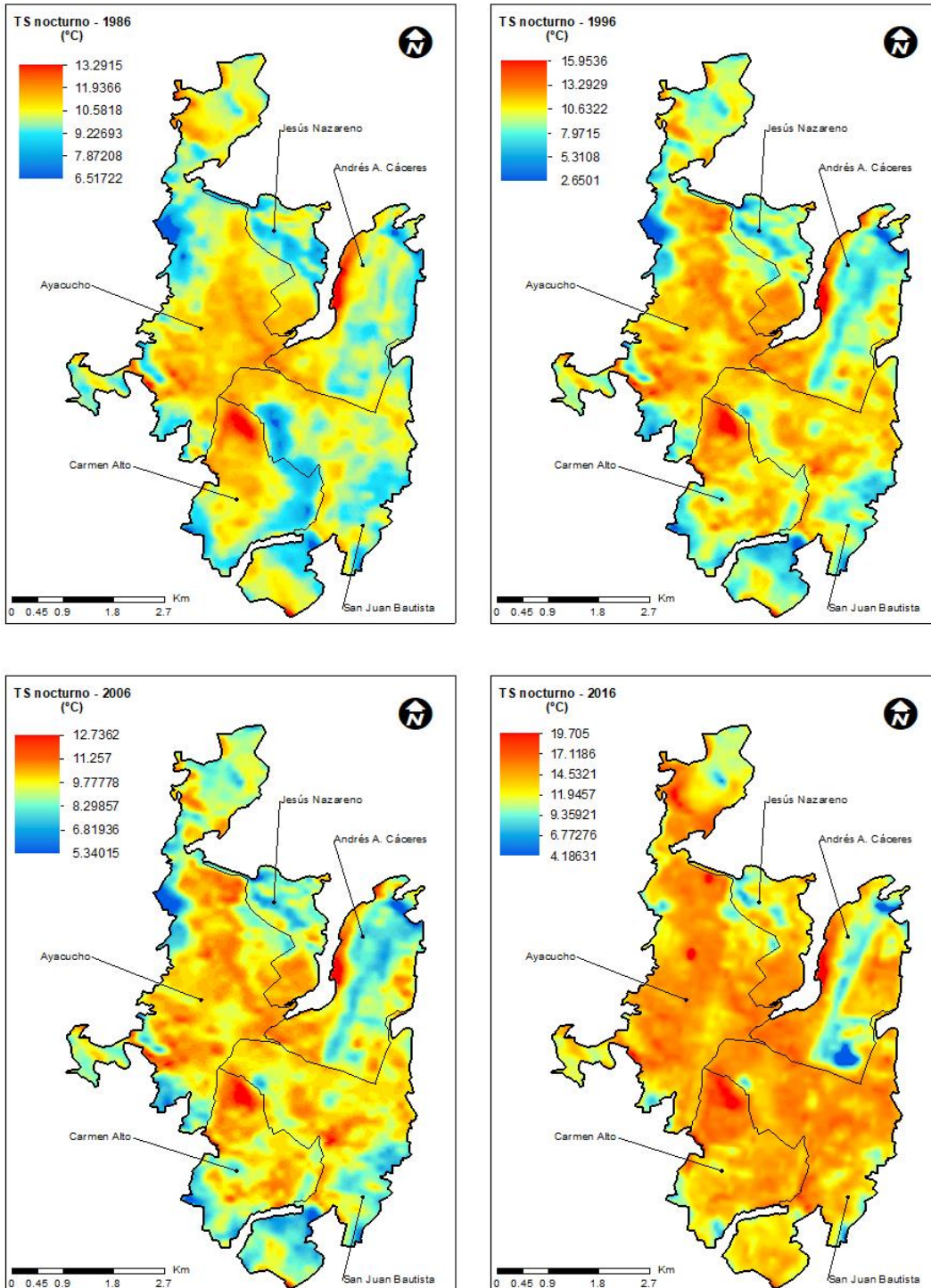


Ilustración 4.31: Serie temporal de TS nocturno para el periodo 1986 a 2016.

Otro factor que contribuye en la modificación de Ts es el grado de contaminación atmosférica, las concentraciones nocturnas de material particulado menor a $10\mu\text{m}$ y $2.5\mu\text{m}$ (MP10 y MP2.5) está asociada con la inversión térmica nocturna que se intensifica hacia la madrugada, por el cual el aire contaminado se concentra en estratos cercanos al ras de la superficie, localizándose en las mañanas en zonas bajas y de topografía abrigada; para la ciudad de Ayacucho estas zonas comprende el espacio límite entre los distritos de Ayacucho, San Juan Bautista, Andrés Avelino Cáceres y Jesús Nazareno.

Esta concentración de MP10 afecta los procesos de interacción radiación-atmósfera: el de la absorción, dispersión, emisión y reflexión. La radiación solar que cae en las zonas mencionadas, una parte es absorbida y la otra es devuelta al espacio a través de la reflexión y la emisión, pero la concentración de contaminantes cerca al ras de la superficie hace que la energía reflejada y emitida sea absorbida y devuelta a la superficie con el consiguiente aumento de Ts.

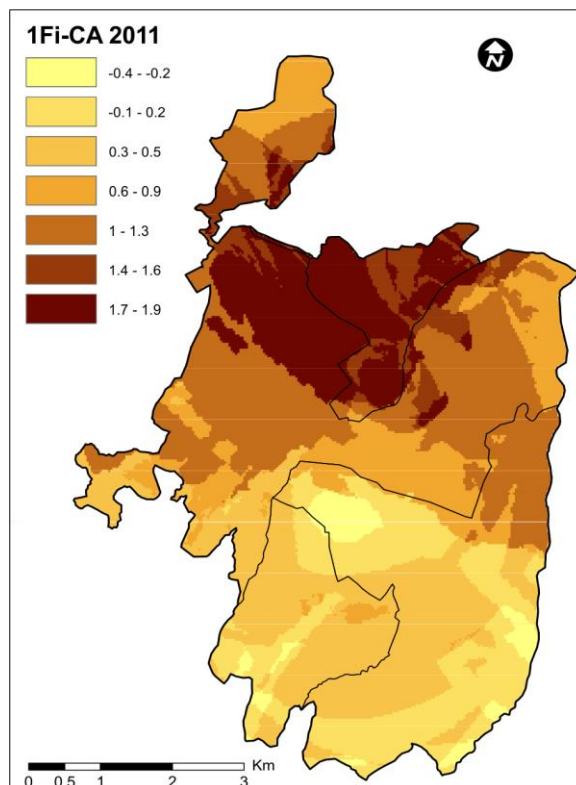


Ilustración 4.32: Distribución de MP10 μm y MP2.5 μm para el año 2011. Fuente: Tesis de Lidia Machaca, 2011.

Comparando los valores de TS diurno y TS nocturno, la TS máximo se registra en el 2016, un aumento de 10.2°C con respecto a TS máximo de 2006; mientras tanto, la TS nocturno en este mismo rango registra un aumento de 3.1°C . En los demás periodos el aumento de TS máximo es mucho menor, 2.6°C y 3.0°C , para los años 1996 y 2006, respectivamente. En el rango de TS media, el aumento es 2.1°C entre 1986 y 1996 y 8.7°C entre 2006 y 2016. El aumento de TS nocturno es menor, 0.6°C entre 1986 y 1996, y 2.3°C entre 2006 y 2016. Estas variaciones se muestran en la Ilustración 4.32.

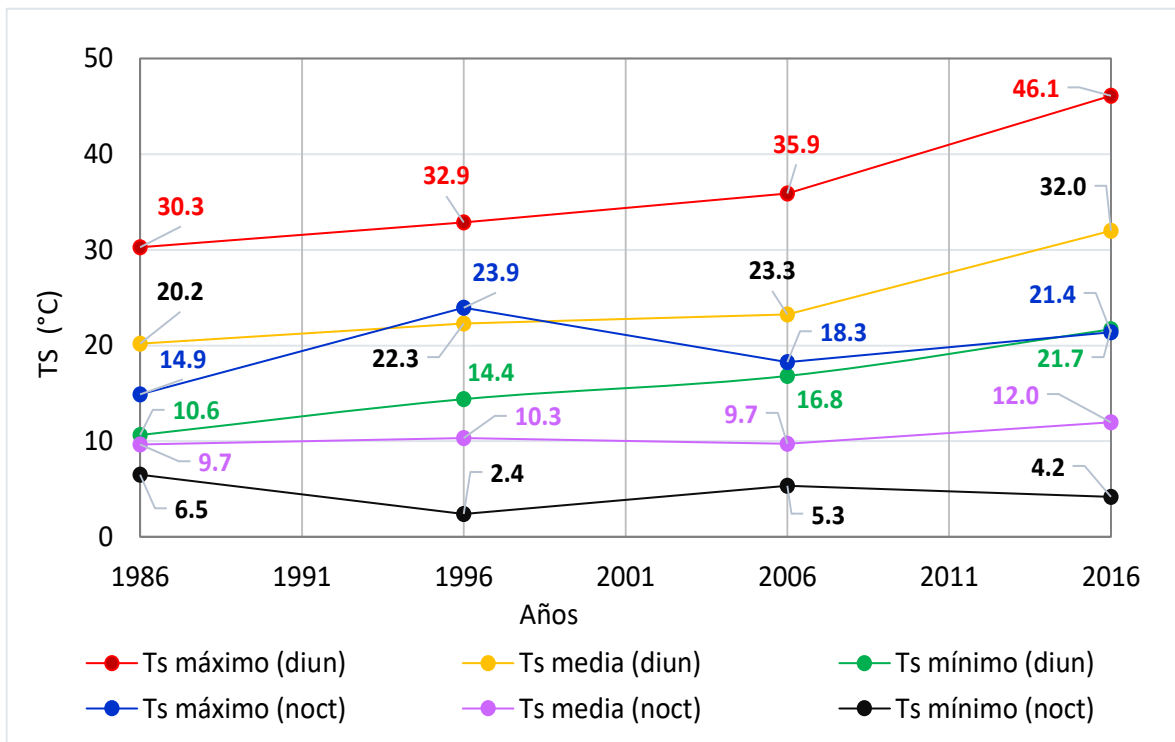


Ilustración 4.33: Evolución temporal de Ts diurno y nocturno entre 1986 y 2016.

En la Tabla 4.8 se muestra la variación de la temperatura de superficie para la zona urbana, periurbana y rural; donde la diferencia de TS diurno de zona urbana frente a la TS de zona rural varía entre 3.23°C y 6.2°C , siendo la mayor diferencia para el 2016 y la menor diferencia para 1996. Asimismo, la diferencia de TS nocturna varía entre 4.78°C y 7.15°C , la mayor diferencia ocurre en 1996 y la

menor diferencia en el 2006. El promedio total para los 4 periodos de estudio es 4.31°C para TS diurno y 5.82°C para TS nocturna.

Para la zona urbana y periurbana, la diferencia varía entre 1.34°C y 3.84°C, mientras la TS nocturna varía entre 1.78°C y 4.64°C, en ambos casos la mayor diferencia ocurre en el 2016. El promedio total de diferencia termal es 2.31°C para TS diurno y 3.08°C para TS nocturna.

Tabla 4.8: Variación de TS diurno y nocturna por tipo de zona, 1986 al 2016.

Zona	Coordenadas UTM		TS diurno (°C)				TS nocturna (°C)			
	X	Y	1986	1996	2006	2016	1986	1996	2006	2016
Tipo										
Rural	584299	8539419	16.9	20.5	19.4	24.3	2.9	1.1	3.1	4.7
	582897	8538830	17.8	19.1	20.9	22.2	5.5	6.6	6.3	7.3
	583075	8539081	19.2	19.6	20.4	24.8	4.0	5.9	5.5	7.4
	583085	8538548	21.0	21.4	21.9	25.7	2.4	2.3	7.3	8.7
Promedio			18.7	20.1	20.6	24.3	3.7	4.0	5.6	7.0
Periurbana	584285	8549090	19.6	21.9	24.6	25.9	6.9	9.5	9.1	9.9
	583259	8542996	20.5	20.1	22.4	25.3	7.6	8.0	8.4	7.0
	586779	8542459	20.3	22.8	22.6	29.7	6.6	6.2	7.4	8.1
	583897	8542139	19.6	22.3	22.5	26.2	5.9	8.8	8.8	6.7
	584219	8540695	19.2	22.8	23.9	26.7	4.0	8.5	8.6	9.3
	585282	8540334	19.6	22.3	23.6	25.8	3.9	9.4	9.1	10.0
Promedio			19.8	22.0	23.3	26.6	5.8	8.4	8.6	8.5
Urbana	583393	8547747	22.4	21.4	24.0	30.3	8.9	11.9	10.7	13.3
	583408	8547011	21.9	25.0	25.3	30.3	9.1	10.6	10.1	13.3
	584881	8546806	23.3	25.9	26.3	31.1	8.6	9.9	9.7	12.7
	583429	8546863	22.8	22.3	23.4	30.1	8.7	11.5	10.5	13.4
	585128	8546154	20.1	19.6	24.4	30.5	9.7	11.9	10.5	13.1
	585215	8546304	21.5	21.9	22.8	31.4	9.2	10.7	9.9	12.5
	585789	8543005	21.0	22.8	23.5	29.4	9.4	12.1	10.9	14.0
	585175	8542857	24.6	28.1	29.9	30.7	8.1	10.5	10.3	12.9
Promedio			22.2	23.4	25.0	30.5	9.0	11.1	10.4	13.1
Diferencia TS (°C)										
Urbana - Rural			3.48	3.23	4.31	6.20	5.25	7.15	4.78	6.10
Urbana - Periurbana			2.37	1.34	1.70	3.84	3.16	2.74	1.78	4.64

4.4.1.2. Distribución espacial de la temperatura de superficie

La distribución espacial de T_s al interior de la ciudad de Ayacucho presenta clara diferenciación, con altos valores en zonas con alta densidad de construcciones y pavimentos, y con valores bajos en la zona periurbana. La temperatura de la superficie está influida, principalmente por factores locales como el tipo de cobertura, la morfología urbana y tipologías edificatorias, la altitud, orientación de las construcciones y la topografía del terreno.

El paso del satélite Landsat por el área de estudio en horario local se registra alrededor de las 09.30 horas. En relación a esto, las imágenes Landsat utilizadas en esta investigación corresponden a finales de otoño e inicios de invierno, cuando el clima es seco y casi siempre soleado. Por ello, en esta época la temperatura diurna en las zonas periféricas que son suelos desnudos y afloramiento de rocas, como el cerro la Picota y cerro Acuchimay, la T_s se eleva sensiblemente razón por la cual presentan mayor T_s que el área urbana.

En cambio, la verticalidad solar en esta época no es muy elevada y las horas de luz diurna son deficitarias respecto a las horas de noche, por ello las temperaturas nocturnas se reducen sensiblemente debido a la fuerte irradiación. Pero también existe una limitante que impone la hora de adquisición de las imágenes utilizadas, pues a la hora del paso del satélite la superficie correspondiente a los pisos bajos aún no ha almacenado suficiente energía. Del mismo modo, el ángulo de elevación solar que varía entre 45° a 53° no sólo determina una menor intensidad de la radiación solar que incide en el suelo, sino que impide que las superficies ubicadas al fondo de la cuenca y al pie de las laderas expuestas al Oeste, como la faldería de Conchopata, Acuchimay, Alameda y también las fachadas de las viviendas expuestas al Sur y al Oeste, absorban menos energía, pues quedan ocultas de la luz solar, originando un efecto de anisotropía que se expresa con la atenuación de la T_s en superficies ensombrecidas.

Los mapas de T_s muestran clara relación espacial con los parámetros urbanos, capacidad térmica y de emisión de los materiales, cobertura vegetal y el contenido de humedad del suelo, en donde las superficies más frías se relacionan con las

áreas con espacios libres para la circulación del aire y la ventilación de espacios públicos, áreas vegetadas y húmedas y cercanos al riachuelo Alameda. Mientras las superficies más cálidas están relacionadas con aquellas zonas urbanizadas, pavimentadas, densidad de construcciones y sobre todo en altura, desprovistas de vegetación y superficies con escaso contenido de humedad.

Los valores de T_s alcanzan valores altos en suelos impermeables, escasamente vegetados, siendo posible apreciar grandes contrastes y gradientes térmicos entre las áreas más cálidas y aquellas con T_s moderadas. En efecto, la zona urbana concentran considerable porcentaje de superficies con temperaturas superiores a 29°C , lo que permite inferir que se trata de superficies con una inercia térmica mucho mayor que la zona periurbana. Para zonas de periferia se asume, que hacia el atardecer, cuando la intensidad de la radiación solar directa disminuye y una vez oculto el sol, la baja inercia térmica que caracteriza a dicha zona incidirá en un rápido descenso de T_s en relación con superficies de zonas urbanas.

En la Ilustración 4.34, los mayores valores de T_s coinciden con las zonas donde ocurren también mayores valores del índice ICU. Al contrastar los valores de T_s en el área urbana consolidada, excluyendo la periferia, se aprecian valores altos en la zona centro y además de los aspectos señalados en párrafos anteriores, las zonas calientes coinciden con el eje vial principal de cada distrito.

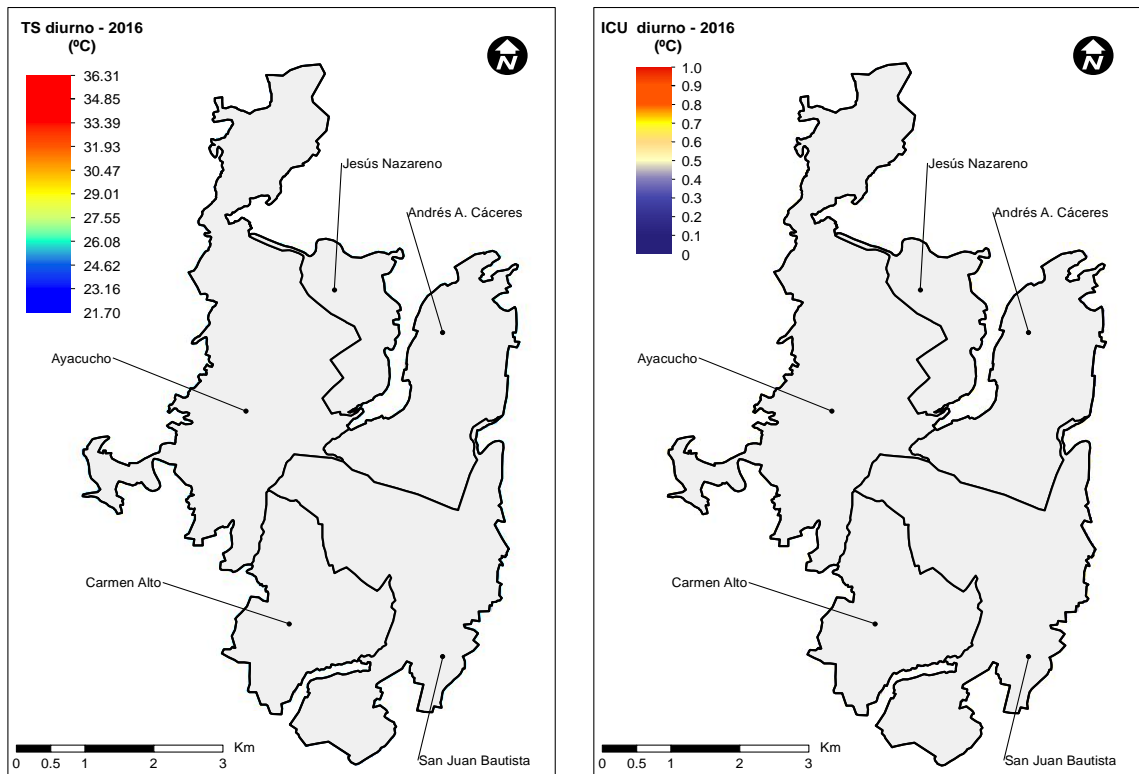


Ilustración 4.34: Distribución espacial de TS versus ICU para el 2016.

Asimismo, las zonas con mayor valor de TS se correlacionan positivamente con los valores del índice ICU, obteniendo en la validación un coeficiente de determinación r^2 de la regresión lineal igual a 0.96, con este cálculo estadístico se determina la correspondencia de la variable con el índice ICU, resultado considerado como aceptable.

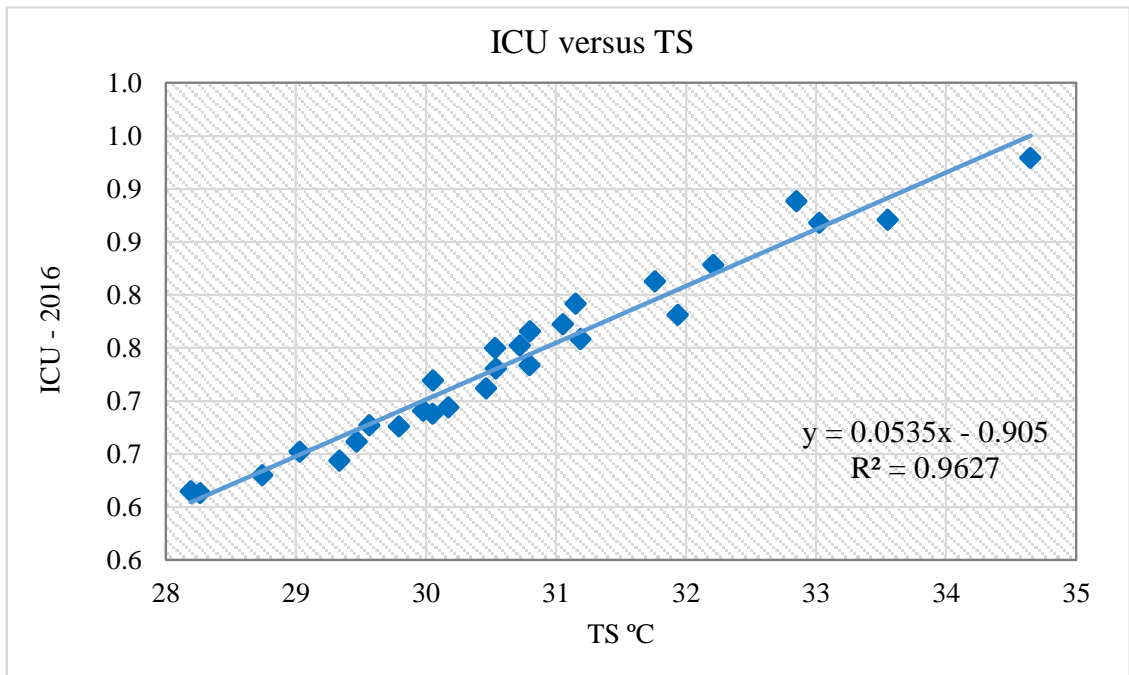


Ilustración 4.35: Coeficientes r^2 en validación de TS versus ICU para el 2016.

4.4.2. Gradiente térmico y su relación con la expansión urbana

4.4.2.1. TS y su relación con el crecimiento urbano

La ciudad de Ayacucho ha experimentado un cambio notorio a partir de mediados de la década de los 80, provocado por la violencia política que se vivió durante 2 décadas, registrándose un crecimiento vertiginoso de la ciudad, ocupando incluso áreas considerado vulnerables como las laderas del cerro la Picota. De acuerdo con los datos obtenidos de la municipalidad provincial de Huamanga, se observó que el área urbana y las construcciones han ido en aumento en la ciudad lo que se puede observar en la Ilustración 4.36.

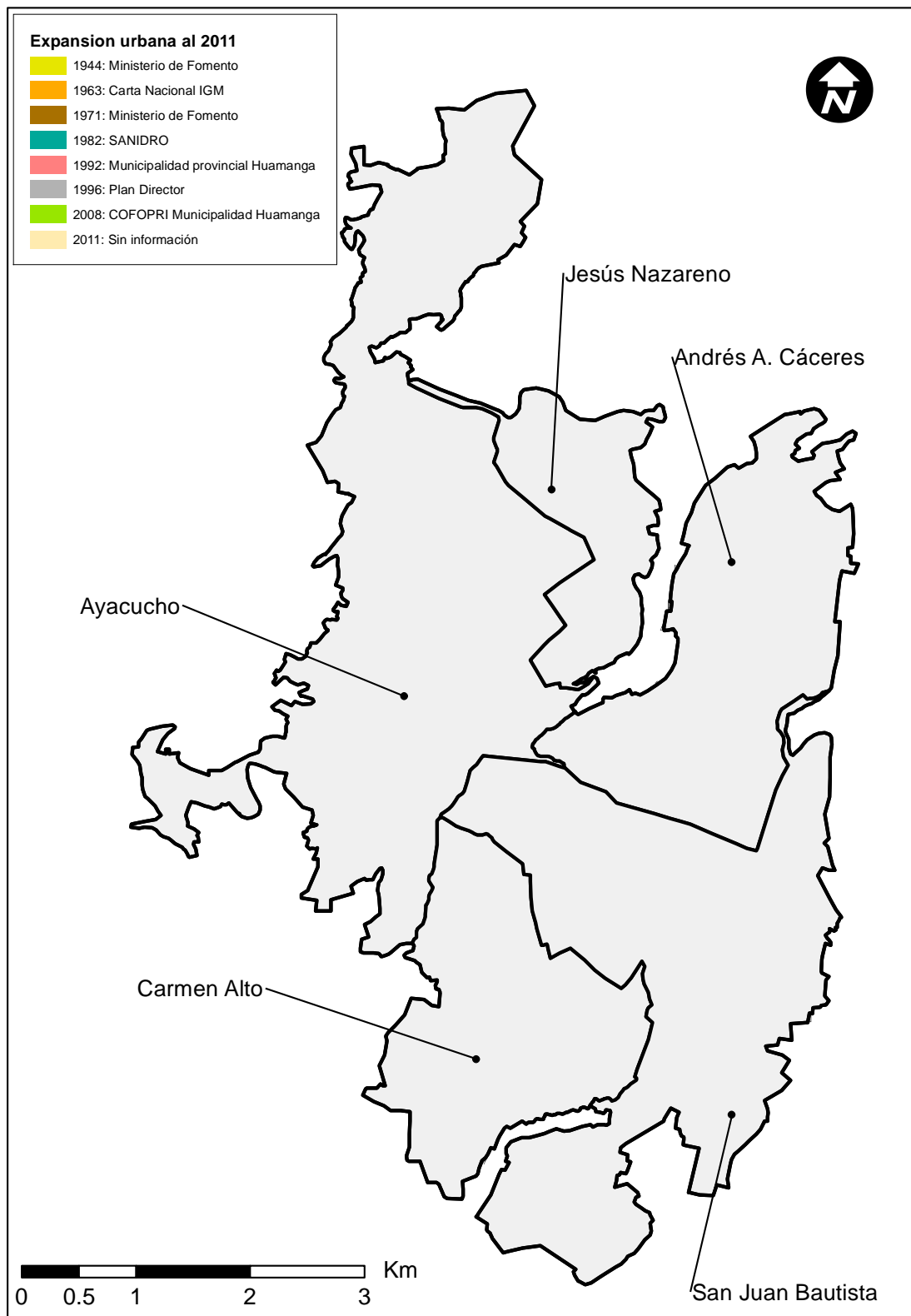


Ilustración 4.36: Mapa de evolución urbana de Huamanga al 2015. Fuente: Municipalidad provincial de Huamanga, 2017.

En el mapa anterior se puede apreciar que la expansión urbana se inicia a partir de 1982 y ocurre en forma radio-céntrica. El inadecuado desarrollo urbano ha provocado que la zona urbanizada de la ciudad de Ayacucho se extienda desordenadamente y con ello creando un impacto ambiental. La migración rural a raíz de la violencia sociopolítica y la concentración de los servicios en la capital del departamento ha ocasionado la llegada de habitantes de otras provincias, con ello la invasión de laderas y de zonas de protección, extendiéndose la mancha urbana en forma multidireccional, provocando la fragmentación urbana o la propagación de la ciudad y sus barrios a zonas rurales en la periferia urbana.

Un efecto de este proceso de urbanización desordenado, conforme se expande la ciudad y al mismo tiempo se densifica las construcciones, ha traído consigo la generación de fenómenos ambientales como la denominada la “Isla de calor urbana”, un fenómeno de elevación de la temperatura superficial a raíz de una combinación de factores tales como la edificación, la falta de espacios verdes, los gases contaminantes. El fenómeno ICUs se manifiesta en la dificultad de disipar el calor durante la noche a comparación de áreas no urbanas que se enfrían rápidamente en situaciones de estabilidad por la falta de acumulación de calor, las zonas urbanas, donde las construcciones y el pavimento desprenden por la noche el calor acumulado en el día, provoca cambios del microclima urbano.

Cabe señalar, varias investigaciones han demostrado que el fenómeno de ICUs aumenta con el tamaño de la ciudad y que es directamente proporcional al tamaño de la mancha urbana, es decir al aumento de la población por unidad de tiempo. En efecto, al parecer esta situación también está asociado en la ciudad de Ayacucho, porque al comprobar mediante el test de Mann-Kendall, la estadística de pendiente del Theil-Sen, y el coeficiente r^2 se obtienen buena respuesta.

Con el test de Mann- Kendall, con un 90% de confianza se obtiene un P valor igual a 0.07, mediante el cual se rechaza la hipótesis nula; es decir, la temperatura diurno de la superficie y su inercia nocturna está asociada a la expansión de la mancha urbana. Asimismo, los límites de la estadística de pendiente de Thiel-Sen varía entre 0.43 a 0.84, difiere significativamente de 0 y existe una tendencia positiva (Ilustración 4.37).

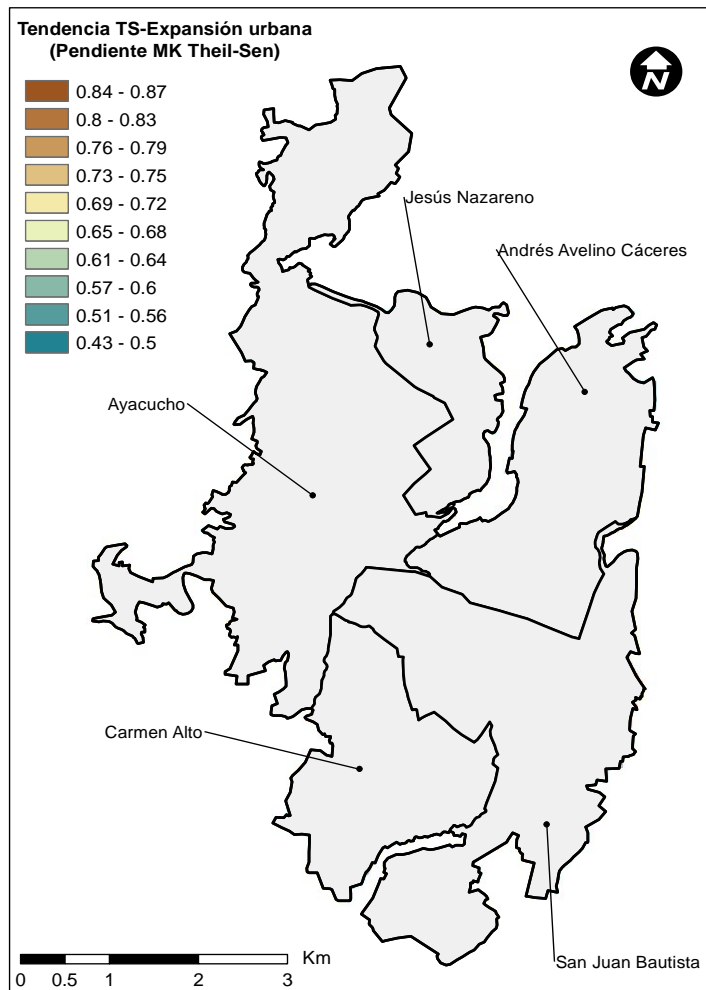


Ilustración 4.37: Mapa de tendencia Theil Sen de Mann-Kendall. Asociación TS y expansión urbana al 2016,

Asimismo, con una prueba de correlación lineal el coeficiente de determinación r^2 resulta significativo con valores entre 0.66 y 0.90, las correlaciones altas (0.84-0.90) se distribuyen en zonas con mayor densidad de construcciones; el centro histórico de la ciudad presenta una correlación moderada (0.79-0.84), mientras el área periurbana, espacios abiertos y vegetados como parques presenta baja correlación (0.66-0.79) como se puede observar en la Ilustración 4.38.

Mediante el test de Mann-Kendall y el cálculo del coeficiente de determinación r^2 se determina que existe una asociación entre zonas construidas y las temperaturas superficiales diurna y nocturna, identificándose mayor temperatura

en zonas más densas, lo que puede explicarse probablemente debido al aumento de la urbanización y el calor antropogénico.

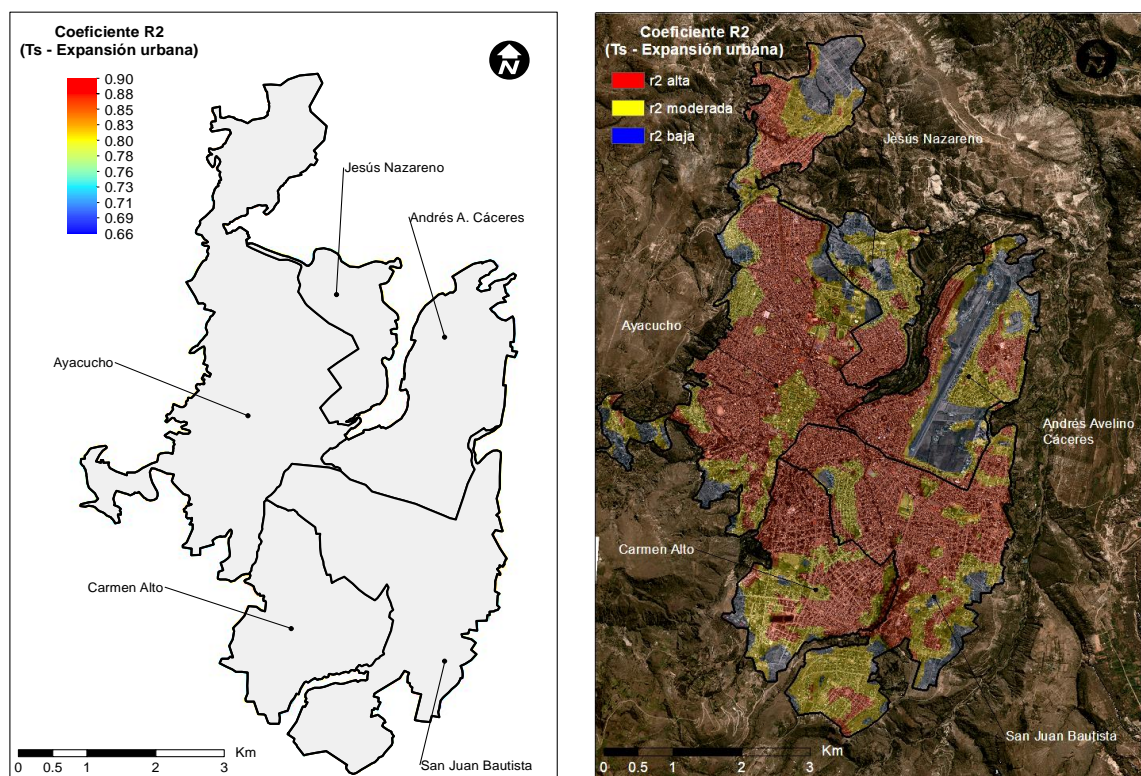


Ilustración 4.38: Coeficiente r^2 en asociación de TS y expansión urbana al 2016.

4.4.2.2. TS y su relación con la morfología urbana

La morfología urbana resulta de la interacción de tres variables: plano de soporte (medio natural, vialidad y traza), usos del suelo y la edificación (forma, altura y tipología de materiales). Para analizar la asociación de Ts con la morfología urbana se utilizó información referente a la trama, forma que genera un conjunto de calles y manzanas, y las tipologías edificatorias. Esta tipificación se realizó aplicando un filtro del tipo paso alto a una imagen satelital de alta resolución espacial, pero también se utilizó un plano catastral obtenido de la municipalidad provincial de Huamanga, las tramas identificadas ha sido en base a 3 formas comunes: damero (lados iguales), rectangular e irregular.

Los resultados de tipificación de tramas y densidad de viviendas con mayor representatividad se muestran en la Ilustración 4.39, sobre la base de estas características se escogieron 3 rangos de bloques morfológicos (Alto, medio y bajo). Estos bloques son de uso residencial, pero difieren en cuanto a trama, densidad de viviendas, superficie impermeable expuesta a la radiación solar, ventilación de espacios públicos, masa vegetal y contenido de humedad del suelo; pese a ello los bloques se asemejan en aspectos morfológicos y constructivos (superficie, altura y materiales de construcción), las cuales nos permita comparar las morfologías y su comportamiento térmico.

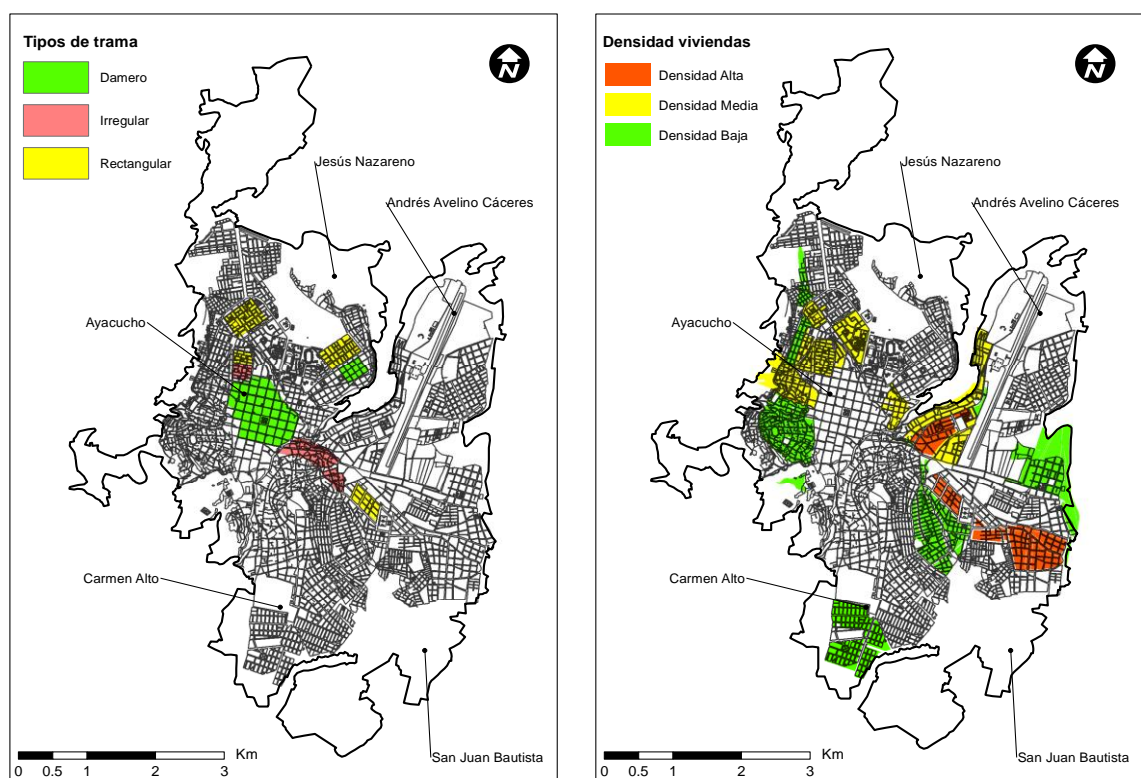


Ilustración 4.39: Tipos de trama urbana y densidad de viviendas.

Con respecto a las tipologías establecidas, el Bloque morfológico Alto tiene trama irregular, alta densidad de viviendas, escaso masa vegetal y bajo contenido de humedad del suelo, mayor superficie pavimentada receptora de radiación solar y canales de ventilación con obstrucciones o sinuosos. En cambio el Bloque morfológico Bajo tiene trama damero o moderadamente rectangular, baja densidad de viviendas, mayor área con vegetación y contenido de humedad del suelo en los primeros 30cm del perfil.

Previa normalización de los datos con el algoritmo Earth Trends Modeler del programa TerrSet se aplicó el test de Mann-Kendall, obteniendo con un 90% de confianza un buen resultado de p-valor igual a 0.0872, este valor no supera el umbral de 0.1, por ello se rechaza la hipótesis nula, es decir si existe diferencia entre las medias de TS según el tipo de morfología de los bloques urbanos analizados. Luego, se realizaron regresiones lineales múltiples entre la variable dependiente ($y = Ts$) y las variables independientes o explicativas ($x =$ Indicadores urbanos).

El grado de relación se ha determinado por el coeficiente de correlación de determinación r^2 , estableciendo el modelo con bondad de ajuste de la regresión que varía entre 0.85 y 0.96, siendo estadísticamente significativo. Las ecuaciones de regresión obtenida para cada tipo de bloque urbano han sido las siguientes:

a) Bloque morfológico alto

$$TS_{\text{diurno}} = 44.085684 + 17.766425 * Fc1 - 11.069836 * Fc2 - 13.649407 * Fc3 - 21.544784 * Fc4$$

$$TS_{\text{nocturna}} = 2.933596 - 13.312383 * Fc1 + 8.294628 * Fc2 + 10.227501 * Fc3 + 16.143507 * Fc4$$

$$R = 0.927655, R^2 = 0.860544$$

b) Bloque morfológico medio

$$TS_{\text{diurno}} = 55.195624 + 12.413284 * Fc1 - 22.492178 * Fc2 - 17.098716 * Fc3 - 25.247916 * Fc4$$

$$TS_{\text{nocturna}} = -5.391082 - 9.301274 * Fc1 + 16.853389 * Fc2 + 12.812067 * Fc3 + 18.918263 * Fc4$$

$$R = 0.924460; R^2 = 0.854626$$

c) Bloque morfológico bajo

$$TS_{\text{diurno}} = 56.841325 + 12.795160 * Fc1 - 24.887794 * Fc2 - 18.259812 * Fc3 - 26.020840 * Fc4$$

$$TS_{\text{nocturna}} = -6.624205 - 9.587413 * Fc1 + 18.648423 * Fc2 + 13.682077 * Fc3 + 19.497415 * Fc4$$

$$R = 0.969699, R^2 = 0.940316$$

Dónde: Fc1= Canales o calles de ventilación, Fc2= Superficie pavimentada de exposición y acumulación de la radiación solar, Fc3= Trama y densidad de viviendas, Fc4= Vegetación y contenido de humedad del suelo. Los factores fueron obtenidos mediante el APC, a excepción del factor 2 que fue obtenido mediante el análisis de desmezclado espectral (UNIMIXING). Para el factor 3, los datos del APC han sido imágenes segmentados y con realce de paso alto, el índice de urbanización y el índice de Factor de Visión del Cielo.

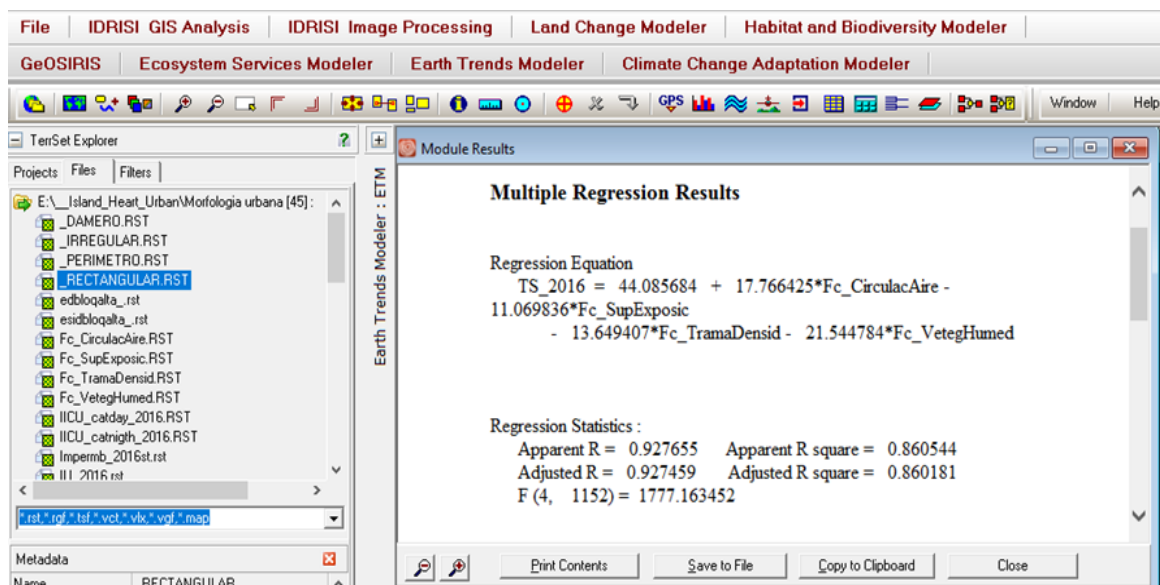


Ilustración 4.40: Resultado de regresión múltiple para tipología bloque alto.

La evaluación de la diferencia térmica para cada tipo de bloque se muestra en la Tabla 4.9. Para los promedios la diferencia térmica no es muy alto, de 1.08°C entre bloque alta y baja; lo que si varía sustancialmente es en los rangos mínimo y máximo, encontrándose una diferencia térmica de TS mínimo diurna entre el

Bloque alta y baja de 5.53°C y de 3.53°C para TS nocturna; sobre la base de estas diferencias encontradas es posible afirmar que el comportamiento térmico de TS varía según el tipo de morfología urbana.

Tabla 4.9: Diferencia térmica diurna y nocturna por tipo de bloque morfológico.

Rangos de TS	TS (°C) / Tipo de bloque			Diferencia de TS (°C)/Tipo de bloque		
	Alta	Media	Baja	Alta-Media	Alta-Baja	Media-Baja
Temperatura de superficie diurna						
Mínimo	28.55	24.61	23.01	3.93	5.53	1.60
Máximo	44.04	43.42	42.40	0.62	1.65	1.02
Promedio	30.77	30.70	29.69	0.07	1.08	1.01
Temperatura de superficie nocturna						
Mínimo	11.47	9.42	7.94	2.05	3.53	1.48
Máximo	23.46	23.10	22.72	0.36	0.74	0.38
Promedio	13.02	12.96	12.91	0.06	0.11	0.05

Dentro de los descriptores geométricos del tejido urbano, la morfología del cañón urbano que es la relación entre la altura de las construcciones y la distancia que los separa, orientación y el Factor de Cielo Visible (Sky View Factor, SVF), son factores claves en la modificación del microclima urbano, disminuyen la ventilación y el enfriamiento en la noche, manteniendo temperaturas altas en la noche. Aunque también, el cañón urbano obstruye el paso de la radiación solar y enfría el aire durante el día, porque la radiación solar no llega igual a todas las superficies.

Un menor cielo visible y una menor exposición al viento, tal como ocurre en una zona de mayor densidad edificada, favorecen una mayor acumulación de energía en el espacio urbano que se traduce finalmente en una mayor temperatura, propiciando el fenómeno de isla de calor.

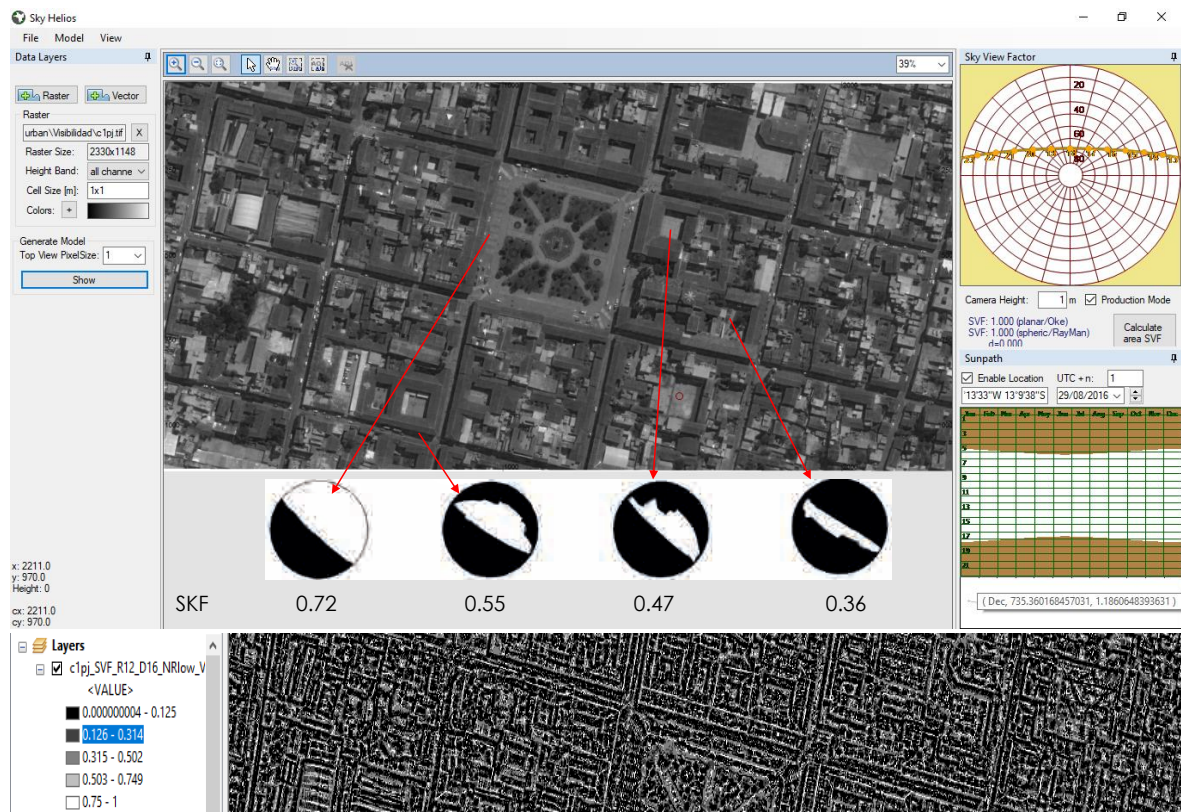


Ilustración 4.41: Captura de pantalla de SkyHelios para el análisis de SVF.

Según Oke (1987), la circulación del aire en un cañón urbano está relacionado con la altura de las viviendas (H), el ancho de la calle (W) y con la longitud de la calle (L), razón por la cual existe tres tipos de flujos: 1) Aislado, 2) Estela interferida, y 3) En vórtice (Ilustración 4.42).

En bloques de vivienda con calles ampliamente espaciados los flujos de aire son aislados, es decir no interactúan entre sí; cuando la calle no es tan ancha se origina un flujo en estela interferida por la obstrucción de las viviendas del frente. Finalmente, cuando el espaciamiento de las viviendas es una calle muy estrecha se origina un flujo en vórtice estable en el cañón urbano que interactúa levemente con el flujo de aire exterior. El flujo en vórtice induce a que el flujo del aire en la calle tenga una dirección contraria a la del viento que circula encima de las viviendas; es por ello, cuando hay baja visibilidad del cielo hay poca ventilación y por ende menor variación diaria de temperatura; contrariamente, cuanto mayor es el valor de cielo visible, hay mayor variación de temperatura porque favorece una mayor ventilación al interior del cañón urbano.

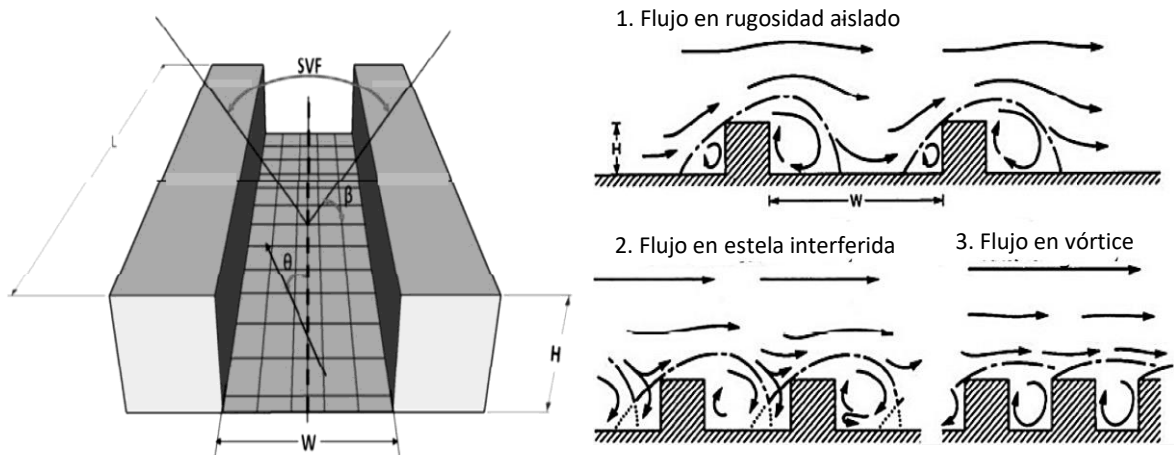


Ilustración 4.42: Esquema de un cañón urbano (izquierda) y flujo del aire sobre el cañón urbano (derecha). Fuente: Oke, 1987.

La ciudad de Ayacucho se encuentra emplazada en una hoyada, como se puede observar en la Ilustración 4.43, donde el principal canal de ventilación natural tiene orientación Sur-Norte, razón por la cual los remolinos de aire o vórtices que se producen en zonas con densas construcciones de viviendas altas, con calles sinuosos y demasiado estrechos; son factores que nos permite explicar del porqué, una ciudad ubicada a 2740 msnm, ya viene presentando indicios de un fenómeno ambiental ampliamente demostrado en las grandes urbes, la isla de calor urbana, demostrado en este estudio con aceptable sustento y metodología. Otro aspecto importante en la generación de la isla de calor urbana es la materialidad de las construcciones y sobre todo el tipo de revestimiento, tema no abordado en este estudio. Alchapar et al., 2012, han demostrado la importancia térmica de los materiales envolventes o de revestimientos, porque absorben la radiación solar e infrarroja y disipan hacia la atmósfera parte del calor acumulado. Es decir, adecuados envolventes urbanos desempeñan un papel clave en la reducción de las ganancias térmicas y el sobrecalentamiento de una ciudad.



Ilustración 4.43: Configuración geográfica de la ciudad de Ayacucho.

CONCLUSIONES

- Se ha identificado las principales variables físicas, ambientales y parámetros urbanos que caracterizan o influyen en la formación del fenómeno de islas de calor urbana para la ciudad de Ayacucho, para los periodos 1986, 1996, 2006 y el 2016. De un total de 17 variables procesadas, 12 fueron seleccionados para la aplicación del modelo ICU para el área de estudio, para lo cual se analizaron la estructura de correlación entre un grupo de variables y de los pesos de aporte.
- Se ha creado el índice de isla de calor urbana (ICU) y los resultados se muestran en un mapa temático de ICU para la ciudad de Ayacucho, según una serie de factores sintéticos derivados del Análisis de Componentes Principales, que permitieron determinar con sustento aceptable la existencia de este fenómeno, y también comparar las variaciones térmicas en la zona urbana y con respecto a su entorno no urbano
- Se logró caracterizar el comportamiento espacial y temporal del fenómeno de la isla de calor en función a las condiciones morfológicas urbanas de la ciudad de Ayacucho y su entorno rural, determinando de cómo las modificaciones urbanas repercuten en microclimas locales, y en particular sobre la temperatura de superficie. Mediante el test no-paramétrico de Mann-Kendall en su versión monotónica y la estimación de la pendiente Theil-Sen con un nivel de confianza al 90% se acepta la hipótesis alternativa, es decir queda demostrado la existencia de una tendencia del fenómeno ICU en la serie temporal analizada.
- Se determinó el comportamiento de la temperatura superficial frente al crecimiento del área urbana para distintos periodos y las características de impacto térmico urbano con respecto a su entorno no urbano, las cuales permiten confirmar de cómo la trama urbana y las tipologías edificatorias modifican los microclimas, generando la formación del fenómeno ICU.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar estudios posteriores sobre el fenómeno de Islas de calor en la ciudad de Ayacucho, puesto que se requiere hacer un seguimiento continuo a fin de establecer medidas de mitigación el aumento del ICU y el desarrollo de hábitats sostenibles.
- Debido a la inexistencia de un estudio similar para la zona de estudio, sería recomendable para los mismos periodos aplicar otras técnicas como las redes neuronales y la lógica difusa, así como la implementación de técnicas híbridas, la cual permita comparar los resultados del presente estudio. Pese a la inexistencia de estudios similares, este trabajo constituye un aporte importante en la planificación urbana de ciudades emplazadas en la sierra de nuestro país.
- Este estudio abarca los meses de mayo a agosto, por la cual en estudios posteriores sería importante extender el análisis para todos los meses y hacer un comparativo completo de las series temporales analizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alchapar, N., Correa, E., & Cantón, M. (2018). Comportamiento térmico de revestimientos verticales, en la mitigación de la isla de calor urbana. Índice de reflectancia solar.
- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Kimberly: University of Idaho, Advanced Training and Users Manual, 98p.
- Ali J.M., Marsh S.H., Smith M.J. (2017). A comparison between London and Baghdad surface urban heat islands and possible engineering mitigation solutions *Sustainable Cities and Society*, 29 , pp. 159-168.
- As-syakur, A. R., Wayan Sandi Adnyana, I. Arthana, I. W., Nuarsa, I. W. (2012). Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing*, vol. 4, issue 10, pp. 2957-2970. 4. 2957-2970. 10.3390/rs4102957.
- Bakker, X. (2000). Análisis geoestadístico y de Exposición solar.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87–100.
- Bonafoni, S., Anniballe, R., Gioli, B. & Toscano, P. (2016). Downscaling Landsat Land Surface Temperature over the urban area of Florence, *European Journal of Remote Sensing*, 49:1, 553-569
- Castillo, M. (2008). La interpolación Espacial y los modelos digitales de terreno.
- Chávez, P. (1996). Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674-2677.

- 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.
- Chen, X.; Zhao, H.; Li, P. & Yin, Z. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, N° 104, p. 133-146.
- Choudhury, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daughtry, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indexes studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1-17.
- Chuvienco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España.
- Chuvienco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel, Barcelona-España.
- Dalence, S. (2013). *Geoestadística*.
- Eastman, R. J. (2004). *IDRISI Kilimanjaro, Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*, Clark Labs Clark University, Worcester, MA 01610-1477, USA.
- Fernández García, F., Allende Álvarez, F., & Alcaide Muñoz, J. (2016). Estudio de detalle del clima urbano de Madrid. Departamento de Geografía de la UAM. Universidad de Cantabria.
- ITC (2001). *ILWIS 3.0 Academic, User's Guide Primera edición*. The Netherlands: The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Sòria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 1.

- Jiménez-Muñoz, J. C. & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal Geophys. Res.*, vol. 108, no. D22, doi:10.1029/2003JD003480.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística teoría y aplicación* Primera edición. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Ciencias.
- Gupta, R. P. (1991). *Remote Sensing Geology*. XVI + 356 pp. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. Price DM 198.00 (hard covers). ISBN 3540528059.
- Hardisky, M. A., V. Klemas, & R. M. Smart (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 49, 77–83.
- Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Ma Y., Kuang Y.Q., & Huang N.S., (2010). Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 110-118.
- Martínez Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, [S.l.], n. 62, p. 83-99, dic. 2014. ISSN 1989-9890. Disponible en: <https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2014-n62-estudio-de-la-isla-de-calor-de-la-ciudad-de-alicante>. Fecha de acceso: 25 abr. 2018 doi:<https://doi.org/10.14198/INGEO2014.62.06>.
- Moran, M., Bryant, R., Thome, K., Ni, W., Nouvellon, Y., Gonzalez Dugo, M., et al. (2001). A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from landsat-5 TM and landsat-7 ETM. *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2), 71-82.
- Moreno García, M. C., & Serra Pardo, J. A. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Biblio 3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*. Universidad de Barcelona, Vol. XXI, nº 1.179. Disponible en: <http://www.ub.es/geocrit/b3w-1179.pdf>.

- Moreno, M. (1993). Estudio del clima urbano de Barcelona isla de calor. Oikostau, Vilassar de Mar, España, 47,193 p.
- Moreno, A., Cañada, R., Cervera, B., Fernández, F., Gómez, N., Martínez, P., Prieto, M., Rodríguez, J. & Vidal, M. (2008). Sistemas y análisis de la información geográfico. Manual de autoaprendizaje con ArcGis Segunda edición. México: Alfa omega Grupo Editor S.A.
- Oke, T.R. (1978). Boundary Layer Climates, Methuen, London and New York.
- Qi, J., Marsett, R., Moran, M., Goodrich, D., Heilman, P., Kerr, Y., et al. (2000). Spatial and temporal dynamics of vegetation in the san pedro river basin area. Agricultural and Forest Meteorology, 105(1-3), 55-68.
- Ramsey, R. D., Wright, J. R., D. L., & McGinty, C. (2004). Evaluating the use of Landsat 30m Enhanced Thematic Mapper to monitor vegetation cover in shrub-steppe environments. Geocarto International, 19, 39-47.
- Kawamura, M., Jayamana. S., & Tsujiko, Y. (1996). Relation between Social and Environmental Conditions in Colombo Sri Lanka and the Urban Index Estimated By Satellite Remote Sensing Data. International Archieve of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31 (B7) 321-326.
- Rikimaru, A. & Miyatake, S., (1997). Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow. In Proceeding of the 18th Asian Conf. Rem. Sens. (ACRS), Kuala Lumpur, Malaysia, 3, 20-25.
- Romero, H. et, al. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. EURE, 36(1009), pp. 35-62.
- Romero, H., Salgado, M. & Smith, P. (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. Revista INVI, Instituto de la Vivienda, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile 70:151-179.

- Roger, A. & Kearney, M. (2004). Reducing signature variability in unmixed coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, N° 12, p. 2317-2335.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Type III Final Report. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD. USA.
- Salvador Figueras, M. (2000). Introducción al Análisis Multivariante, disponible en <http://www.5campus.com/leccion/anamul>, consulta 20/04/2018.
- Sarricolea Espinoza, P. & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de geografía Norte Grande*, (57), 123-141. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>.
- Santana, L. M. (2007). Landsat ETM+ image applications to extract information for environmental planning in a Colombian City. En: *International Journal Remote sensing*. (Colombia). Science Direct . p. 4225-4242. ISSN: 0034-4257
- 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*, vol. 24; 583-594.
- Zhao, H.M. & Chen, X.L. (2005). Use of Normalized Difference Bareness Index in Quickly Mapping Bare Areas from TM/ETM+. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 3 (25-29) 1666-1668.
- Zhang, E.-J & Zhang, J.-J & Zhao, X.-Y & Zhang, X.-L. (2008). Study on urban heat island effect in Shenzhen. 17. 19-24.
- Molina, G. Z. (2005). Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando la teledetección: Maracay, estado Aragua-Venezuela. En *Revista Geográfica Venezolana*. Universidad de los Andes, Escuela de Ciencias Forestales y Ambientales. Disponible en: <http://www.invenia.es/oai:dialnet.unirioja.es:ART0000064524>.

- Wittich, K., & Hansing, O. (1995). Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data. *International Journal of Biometeorology*, 38(4), 209-215.
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 84, pp. 493-505.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 27:14, 3025-3033.

**UNSCH**ESCUELA DE
POSGRADO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD 084-2021-UNSCH-EPG/EGAP

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado - UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución Directoral N^º 198-2021-UNSCH-EPG/D, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Autor:	Bach. JOSE HUGO DE LA CRUZ FLORES
Maestría:	CIENCIAS DE LA INGENIERIA
Mención:	GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE
TÍTULO DE TESIS:	ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA CIUDAD DE AYACUCHO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL PERIODO 1986-1996-2006-2015.
Evaluación de originalidad:	20% de similitud
N^º de trabajo:	1734227508
Fecha:	20-dic.-2021

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 20 de diciembre del 2021.


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
CRISTÓBAL DE HUAMANGA
ESCUELA DE POSGRADO
B/Ing. Edith Geovana Asto Peña
Responsable Área Académica

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA CIUDAD DE AYACUCHO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL PERIODO 1986-1996-2006-2015.

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.cuencaguadalfeo.com Fuente de Internet	2%
2	repositorio.educacionsuperior.gob.ec Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	1%
5	doku.pub Fuente de Internet	1%
6	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
7	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
8	hum.unne.edu.ar Fuente de Internet	1%

9	www.kumbaya.name Fuente de Internet	<1 %
10	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	ceagi.org Fuente de Internet	<1 %
12	rdu.unc.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
13	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
14	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
15	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
16	pearl.plymouth.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
17	edoc.pub Fuente de Internet	<1 %
18	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
19	www.thefreelibrary.com Fuente de Internet	<1 %
20	docslide.us Fuente de Internet	<1 %

21	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
22	www.scielo.cl Fuente de Internet	<1 %
23	Submitted to Higher Education Commission Pakistan Trabajo del estudiante	<1 %
24	revistas.usbbog.edu.co Fuente de Internet	<1 %
25	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.ucm.edu.co Fuente de Internet	<1 %
27	scielo.conicyt.cl Fuente de Internet	<1 %
28	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
29	exploredoc.com Fuente de Internet	<1 %
30	literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universidad de Málaga - Tii Trabajo del estudiante	<1 %
32	qdoc.tips Fuente de Internet	

<1 %

33 documentop.com
Fuente de Internet

<1 %

34 saber.ucv.ve
Fuente de Internet

<1 %

35 repositorio.unsch.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

36 repositorio.unapiquitos.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

37 www.sgapeio.es
Fuente de Internet

<1 %

38 repositorioacademico.upc.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

39 renati.sunedu.gob.pe
Fuente de Internet

<1 %

40 Submitted to Universidad Católica de Santa
María
Trabajo del estudiante

<1 %

41 ri.agro.uba.ar
Fuente de Internet

<1 %

42 www.redalyc.org
Fuente de Internet

<1 %

43 creativecommons.org
Fuente de Internet

		<1 %
44	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
45	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	<1 %
46	www.ciriongeo.co.cc Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	es.wikipedia.org Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
50	archive.org Fuente de Internet	<1 %
51	repositorio.unaj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
52	A.M. Esteban, C.N. Zárate, V.A. Mortara, M.B. Berardi. "Obtención de Variables Exógenas para Mejorar la Performance del Pronóstico a Partir de Análisis Multivariado", Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, 2014 Publicación	<1 %

53	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
54	bibliotecadigital.univalle.edu.co Fuente de Internet	<1 %
55	www.aet.org.es Fuente de Internet	<1 %
56	repository.eia.edu.co Fuente de Internet	<1 %
57	Submitted to Universidad Santiago de Cali Trabajo del estudiante	<1 %
58	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1 %
59	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
60	repository.udca.edu.co Fuente de Internet	<1 %
61	technav.systemicist.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA CIUDAD DE AYACUCHO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL PERIODO 1986-1996-2006-2015.

por Jose Hugo De La Cruz Flores

Fecha de entrega: 20-dic-2021 08:19a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1734227508

Nombre del archivo: tesis_2021_final.pdf (9.28M)

Total de palabras: 40589

Total de caracteres: 206846



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS DE MAESTRIA DEL

BACH. JOSÉ HUGO DE LA CRUZ FLORES

En la ciudad de Ayacucho, siendo a horas 3:00 p.m del Veintiocho de octubre de dos mil veintiuno, en el auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la tesis ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA LA CIUDAD DE AYACUCHO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL PERIODO 1986 - 1996 - 2006 - 2015, presentado por el aspirante a Grado de Maestro en Ciencias, de la Ingeniería, Mención en Gerencia de Proyectos y Medio Ambiente. El Presidente del jurado Dr. Emilio G. Ramírez Roca, dispuso al Secretario docente Dr. José Alarcón Guerrero, de lectura a la Resolución Directoral N° 00429-2021-UNSH-EP6-L y el Art° 83 del Reglamento de la Escuela de Posgrado, en seguimiento al aspirante dar inicio a la sustentación y defensa pública de la tesis mencionada por el tiempo no mayor de 45 minutos, conforme lo establece el Reglamento. Finalizada la exposición, los miembros del jurado formularon las preguntas y observaciones en el orden siguiente: Msc. Edmundo Canchani Gutierrez (miembro), Msc. Javier Francisco Taipe Carbaja (Director de la UPG-FIM6C)

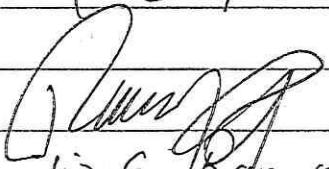
NOTA: No se continuó por error en la redacción.

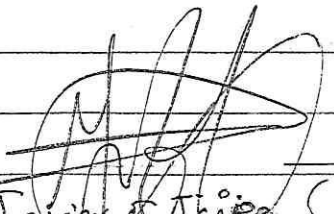
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS DE MAESTRIA DEL

BACH. JOSÉ HUGO DE LA CRUZ FLORES

En la ciudad de Ayacucho, siendo a horas 3:00 p.m del día Veintiocho de octubre de dos mil veintiuno en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, se reunieron los miembros del jurado calificador conformado por el Dr. Emilio G. Ramírez Roca (presidenta), Msc. Javier F. Taipe Carbajal (Director - UPG-FIM6C), Msc. Cipriano

Mendoza Rojas (miembro) y el Msc. Edmundo Canchani Gutierrez (miembro), para recibir y calificar la sustentación de la tesis: **ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA ISLA DE COLOR URBANA DE LA CIUDAD DE DYDUCHO MEDIANTE PERCEPCION REMOTA POR EL PERIODO 1986-1996-2006-2015** presentado por el Bache José Hugo DE LA CRUZ FLORES, con la cual aspira obtener el Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Gerencia de Proyectos y Medio Ambiente. El Presidente del Jurado Dr. Emilio G. Ramirez Roca dispuso al Secretario docente Dr. José Marcon Guerrero dar lectura a la Resolución Directoral N° 00429-2021-VNSCH-EP6-D y el Art° 83 del Reglamento de la Escuela de Posgrado, en seguida invito al aspirante dar inicio a la sustentación y defensa pública de la tesis mencionada por el tiempo no mayor de 30 minutos, conforme lo establece el Reglamento. Finalizada la exposición, los miembros del jurado formularon las preguntas y observaciones en el Orden siguiente: Mg. Cipriano Mendoza Rojas (miembro), Msc. Edmundo Canchani Gutierrez (miembro), Mr. Javier F. Taipe Carbajal y finalmente el Dr. Emilio G. Ramirez Roca. Las preguntas fueron absueltas por el aspirante, en tanto las observaciones deben ser subsanadas en la versión final de la tesis a entregar. Luego de ello el presidente del Jurado, invito al aspirante y al público asistente abandonar momentáneamente el auditorio para dar paso a la deliberación y calificación por cada uno de los miembros del Jurado y el resultado promedio es de dieciséis (16) aprobando por unanimidad. Siendo a horas p.m finaliza el acto de sustentación. En fe de la cual firman los asistentes al pie del presente, en señal de conformidad y compromiso.


Dr. Emilio G. Ramirez Roca
Presidente


Msc. Javier F. Taipe Carbajal
Director UPG



[Handwritten signature]

Ms. Dipriano Mendoza Rojas

[Handwritten signature]
Msc. Edmundo Canchón
Gutiérrez