

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO
CON FACTORES DEMOGRÁFICOS, ESPACIALES Y AMBIENTALES
DE LIMA METROPOLITANA USANDO SENSORES REMOTOS”**

Presentada por:

Sandra Natalia Teruya Revilla

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

**LIMA-PERÚ
2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO
CON FACTORES DEMOGRÁFICOS, ESPACIALES Y AMBIENTALES
DE LIMA METROPOLITANA USANDO SENSORES REMOTOS”**

Presentada por:

Sandra Natalia Teruya Revilla

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente Jurado:

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
PRESIDENTE

Ing. Héctor Huisacaina Soto
MIEMBRO

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Mg. Sc. Ernesto Menacho Casimiro
PATROCINADOR

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi familia, a mis padres, Eduardo y Silvia, y mis hermanas, Gracia y Brenda. Quienes me han apoyado durante mi carrera universitaria y sobre todo en el periodo de desarrollo de mi tesis.

AGRADECIMIENTO

La realización de esta Tesis ha sido posible gracias al apoyo de diferentes personas que han aportado de manera directa e indirecta. Personas que me han apoyado, dándome sugerencias, corrigiendo, mejorando mi procesamiento de información o mi redacción e incluso dándome ánimos cuando parecía que estaba estancada.

Particularmente agradezco el apoyo de mi asesor, Mg. Sc. Ernesto Menacho, quien me dio su respaldo y guía constante y con lo cual ha sido posible el desarrollo esta investigación. También agradezco a mi padre, Dr. Eduardo Teruya, quien me apoyó en todo momento y me ayudó en diferentes etapas del desarrollo mi tesis y con quién discutí desde las ideas más vagas hasta las más relevantes de mi Tesis. Además, quiero agradecer a mis jurados, Mg. Sc. Eusebio Cisneros, Ing. Franklin Unsihuay e Ing. Héctor Huisacaina, quienes han aportado su invaluable tiempo y asesoría. Finalmente, quiero dar las gracias a mis amigos y familiares que me ayudaron en todo el proceso e incluso a encontrar las ganas de seguir trabajando cuando me veía atascada.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	FACTORES QUE INFLUENCIAN A LA PRESENCIA DE LA ICU	3
2.2.	CONSECUENCIAS DE LA ISLA DE CALOR URBANO	5
2.3.	MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO	6
2.4.	INDICADOR DE LA ICU: INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO	6
2.5.	SENSORAMIENTO REMOTO	7
2.5.1.	INFORMACIÓN SATELITAL	7
2.5.1.a.	LANDSAT	7
2.5.1.b.	ASTER GDEM	8
2.5.2.	CORRECCIONES DE LAS IMÁGENES SATELITALES	9
2.5.2.a.	CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS	9
2.5.2.b.	CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS	10
2.5.2.c.	CONVERSIÓN DE ND A PARÁMETROS FÍSICOS	11
2.5.2.d.	CORRECCIONES GEOMÉTRICAS	12
2.5.3.	INDICADORES ESPACIALES	13
2.5.3.a.	NDVI	13
2.5.3.b.	NDBI	13
2.5.3.c.	TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO	14
2.5.4.	ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE DEL SUELO	14
2.5.4.a.	<i>SINGLE CHANNEL</i> (SC)	14
2.5.4.b.	<i>SPLIT WINDOW</i> (SW)	15
2.5.4.c.	ESTIMACIÓN DE EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DEL SUELO PARA LOS ALGORITMOS <i>SINGLE-CHANEL</i> Y <i>SPLIT-WINDOW</i>	16

2.5.4.d.	DETERMINACIÓN DEL VAPOR DE AGUA ATMOSFÉRICO PARA LOS ALGORITMOS <i>SINGLE-CHANEL</i> Y <i>SPLIT-WINDOW</i>	19
2.5.5.	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	20
2.5.5.a.	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL	20
2.5.5.b.	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN.....	20
2.5.5.c.	INFERENCIA EN EL MODELO DE REGRESIÓN (P-VALOR)	21
2.5.5.d.	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ESPACIAL.....	21
2.6.	ANTECEDENTES	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO	26
3.2.	MATERIALES	27
3.3.	MÉTODO.....	29
3.3.1.	OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.....	29
3.3.2.	DETERMINACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO.....	29
3.3.2.a.	PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN SATELITAL.....	29
3.3.2.b.	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO.....	31
3.3.2.c.	COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS SC Y SW	33
3.3.2.d.	DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO.....	33
3.3.3.	EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO	34
3.3.3.a.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS: ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO	34
3.3.3.b.	RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE	

	VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO	35
3.3.4.	ESTABLECER RELACIONES DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS NO, NO ₂ SO ₂ , O ₃ Y PM ₁₀	36
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
4.1.	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO	39
4.2.	INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO	43
4.2.1.	COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE TEMPERATURA.....	43
4.2.2.	DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE ISLA DE CALOR URBANO.....	49
4.3.	EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO	105
4.3.1.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS: LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO	105
4.3.2.	RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDBI), Y USO DEL SUELO	112
4.4.	ESTABLECER RELACIONES DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ Y PM ₁₀	115
V.	CONCLUSIONES.....	119
VI.	RECOMENDACIONES.....	120
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
VIII.	ANEXOS	126

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Bandas del Landsat 8.....	8
Tabla 2: Contantes para la ecuación (13)	16
Tabla 3: Valores de emisividad para ϵ_S y ϵ_V para las correspondientes bandas térmicas del Landsat 8.....	17
Tabla 4: Valores de emisividad utilizados por Lo y Quattrochi (2003) para la clasificación de uso/cobertura de suelo de Atlanta.....	18
Tabla 5: Valores de emisividad utilizados por Javed, <i>et al.</i> (2012) para la clasificación de uso/cobertura de suelo de Atlanta.....	19
Tabla 6: Imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas en la investigación	27
Tabla 7: Estaciones del SENAMHI.....	28
Tabla 8: Opciones de <i>Atmospheric model</i> para el módulo	30
Tabla 9: Categorización de la Intensidad de ICU según rango	34
Tabla 10: Valores de correlación entre la ICU y la densidad urbana y el tipo de uso de suelo.....	36
Tabla 11: Valores de Coeficiente de determinación (R^2) de NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 y la intensidad de ICU	37
Tabla 12: Valores de coeficiente de correlación de Pearson (R) de SO_2 , NO_x , polvo y la Temperatura del suelo con un nivel de significancia de 0.05.....	38
Tabla 13: Parámetros meteorológicos reportados por estaciones del SENAMHI y Valores vapor de agua atmosférico ($w - g/cm^2$) calculado.....	40
Tabla 14: Comparación de las temperaturas ($^{\circ}C$) observadas y las calculadas con los métodos SC y SW.	44
Tabla 15: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis.....	46
Tabla 16: Valores de P para la prueba de Kruskal-Wallis: Comparaciones por parejas – Prueba de Dunn.....	47
Tabla 17: Valores promedio de temperatura de superficie del suelo ($^{\circ}C$) de la zona rural ...	49
Tabla 18: Resultados de la relación estadística para la intensidad de ICU en las fechas estudiadas para el método SC con la ecuación de Xiaolei y parámetros espaciales y demográficos	113

Tabla 19: Concentración de contaminantes reportados por el SENAMHI.....	115
Tabla 20: Resultados de la relación para la intensidad de ICU en las fechas estudiadas y Contaminantes	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variables que generan la ICU.....	4
Figura 2: Línea de tiempo de los satélites Landsat.....	7
Figura 3: Puntos de muestra del estudio.....	22
Figura 4: Área de estudio.	26
Figura 5: Plataforma de la página web http://reverb.echo.nasa.gov/	29
Figura 6: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 para la obtención de las imágenes de Temperatura de superficie.....	32
Figura 7: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua de Xiaolei para el 25/12/2013	42
Figura 8: Resultados de la prueba de normalidad de las temperaturas.....	45
Figura 9: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 25 de Diciembre de 2013 en Lima Metropolitana y las diez (10) zonas de evaluación.....	51
Figura 10: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 11 de Febrero de 2014 en Lima Metropolitana y las diez (10) zonas de evaluación.....	52
Figura 11: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 16 de Abril de 2014 en Lima Metropolitana y las diez (10) zonas de evaluación.....	53
Figura 12: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 29 de Enero de 2015 en Lima Metropolitana y las diez (10) zonas de evaluación.....	54
Figura 13: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona A	56
Figura 14: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona A	57
Figura 15: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona A	58
Figura 16: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona A	59
Figura 17: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona B	61

Figura 18: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona B	62
Figura 19: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona B	63
Figura 20: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona B	64
Figura 21: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona C	66
Figura 22: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona C	67
Figura 23: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona C	68
Figura 24: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona C	69
Figura 25: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona D	71
Figura 26: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona D	72
Figura 27: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona D	73
Figura 28: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona D	74
Figura 29: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona E	76
Figura 30: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona E	77
Figura 31: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona E	78
Figura 32: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona E	79
Figura 33: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona F.....	81
Figura 34: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona F.....	82

Figura 35: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona F.....	83
Figura 36: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona F.....	84
Figura 37: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona G.....	86
Figura 38: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona G.....	87
Figura 39: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona G.....	88
Figura 40: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona G.....	89
Figura 41: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona H.....	91
Figura 42: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona H.....	92
Figura 43: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona H.....	93
Figura 44: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona H.....	94
Figura 45: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona I.....	96
Figura 46: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona I.....	97
Figura 47: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona I.....	98
Figura 48: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona I.....	99
Figura 49: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona J.....	101
Figura 50: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona J.....	102
Figura 51: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona J.....	103

Figura 52: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona J	104
Figura 53: Elevación (m.s.n.m.) del Área de estudio	106
Figura 54: Distancia a cuerpos de agua (m.) del Área de estudio	107
Figura 55: Densidad poblacional (Hab/Km ²) del Área de estudio	108
Figura 56: Valores de índice de vegetación normalizada (NDVI) el 25/12/2016 del Área de estudio.....	109
Figura 57: Valores de índice de edificación normalizada (NDBI) el 25/12/2016 en el Área de estudio.....	110
Figura 58: Clasificación de uso de suelo del Área de estudio.....	111

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa de Puntos para el análisis estadístico.....	127
Anexo 2: Mapas de temperaturas de superficie del suelo	130
Anexo 3: Mapas de NDVI y NDBI	147
Anexo 4: Boxplots de las Temperaturas para la comparación de los métodos	156
Anexo 5: Datos recogidos del SENAMHI	158
Anexo 6: Datos demográficos del INEI (2014).....	186
Anexo 7: Gráficos de dispersión IICU Vs Elevación, Distancia a cuerpos de agua, densidad urbana, NDVI, NDBI y uso de suelo	189

RESUMEN

OBJETIVO: Determinar la presencia de la Isla de Calor Urbano (ICU), usando sensores remotos, y establecer su relación con factores demográficos, espaciales y ambientales dentro del Área de estudio en Lima Metropolitana. **MATERIAL Y METODOS:** Se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 8 tomadas en verano entre 01/dic/2013 y 30/abr/2015, para determinar la Temperatura de superficie del suelo. También se trabajó con la imagen satelital ASTER GDEM e información espacial (*shape file*) del MINAM para determinar la relación entre la Intensidad de ICU (IICU) y los factores de estudio. Se eligieron las imágenes satelitales que tenían menos interferencia (nubes) (25/dic/2013, 11/feb/2014, 16/abr/2014 y 29/ene/2015), posteriormente se procesaron con los programas ENVI 5.1, QGIS 2.0, Minitab 17 y L-LDOPE y se obtuvo la Temperatura de la superficie del suelo usando los métodos *Single Channel (SC)* y *Split Window (SW)*, también se determinó la correlación entre la IICU y los factores de estudio. **RESULTADOS:** Se identificaron islas de calor y de frío que variaron de intensidad y extensión, no todas fueron permanentes durante los cuatro (04) periodos evaluados. La Elevación (m.s.n.m.), la Distancia a los cuerpos de agua (m.), el Índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y el Uso de suelo tuvieron correlación estadística positiva ($p < 0.001$) con la IICU, mientras que el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) tuvo una correlación estadística negativa con la IICU ($p < 0.001$). No se encontró suficiente evidencia estadística para afirmar que hay una relación entre la concentración de NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ y la IICU para los periodos evaluados, dentro del área de estudio. **CONCLUSIONES:** Se identificaron islas de calor y de frío de extensión e intensidad variables. Se determinaron algunos factores que influyen sobre IICU.

Palabras claves: Isla de calor urbano, Landsat 8, Sensoramiento remoto, Lima Metropolitana, *Single Channel* y *Split Window*.

ABSTRACT

AIM: To determine the presence of the Urban Heat Island (UHI) using remote sensing and establish its relationship with demographic, spatial and environmental factors within the Study Area in Lima Metropolitana. **MATERIALS AND METHODS:** In this investigation it was used Landsat 8 satellite images taken during the summers between 01/dic/2013 and 30/apr/2015 in order to obtain the Land surface temperature. It was also employed ASTER GDEM satellite image and MINAM spatial information (shape file), to determine the relationship between the intensity of ICU (IICU) and the Study Factors. Satellite images with less interference (clouds) were chosen (25/dic/2013, 11/feb/2014, 16/apr/2014 y 29/jan/2015), subsequently the images were processed with ENVI 5.1, QGIS 2.0, Minitab 17 and L-LDOPE softwares to obtain Land surface temperature using Single Channel (SC) and Split Window (SW) methods, also it was determined the correlation between the Study Factors and IICU. **RESULTS:** Heat and cold islands with varying intensity and extent were identified and not all of them were permanent during the four (04) evaluated periods. Elevation (m.s.n.m.), Distance to water bodies (m.), Normalized difference build-up index (NDBI) and Land use had positive statistical correlation ($p < 0.001$) with the IICU, while the Normalized difference vegetation index (NDVI) had a negative statistical correlation with IICU ($p < 0.001$). There was no sufficient statistical evidence to affirm that there was a relationship between the concentration of NO, NO₂, SO₂, O₃ and PM₁₀ and IICU, for the periods evaluated within the study area. **CONCLUSIONS:** Heat and cold islands with extension and intensity variables were identified. Some factors influencing IICU were determined.

Key words: Urban heat island, Landsat 8, Remote sensing, Lima Metropolitana, Single Channel and Split Window.

I. INTRODUCCIÓN

El clima urbano es particularmente diferente a aquellos presentes en la naturaleza. Las modificaciones atmosféricas y térmicas de las urbes se deben principalmente a la alteración de la cobertura del suelo (por ejemplo: el paso de cobertura agrícola o silvícola a cobertura urbana) y la contaminación de la atmósfera (Oke, 1987).

La alteración climática más resaltante de las zonas urbanas es la Isla de calor urbano (ICU). Esto implica que la temperatura de una ciudad es significativamente mayor a la de las zonas rurales cercanas. Este fenómeno es consecuencia del cambio de cobertura de suelo, de una cobertura agrícola o silvícola a una urbana. La cobertura de las ciudades es principalmente carreteras, calles y edificios, estas estructuras con materiales de alta capacidad calorífica ocasionan que el calor sea retenido, calentando la ciudad. Además, el calor emitido por vehículos, fábricas y equipos de aire acondicionado añade energía al sistema, lo que agrava aún más el efecto de ICU. Al mismo tiempo, este fenómeno puede causar molestias a las personas, afectando su salud, agravando el asma y otras enfermedades respiratorias. En consecuencia, esta alteración térmica tiene impactos sobre el consumo de energía, la contaminación atmosférica, la salud y el bienestar de las personas (EPA, 2009).

Existen varios estudios sobre la ICU en distintas ciudades. Rizwan, et al. (2008) señaló algunas ciudades, entre ellos está Tokio, Atlanta y Seúl. Igualmente, hay varias investigaciones en las cuales se evalúa la relación entre la ICU y factores demográficos, geográficos y climáticos. De esta manera se encontró que las áreas verdes disminuyen el efecto de la ICU (Lin y Yuanzhi, 2011 y Rajeshwari y Mani, 2014) y las zonas altamente urbanizadas favorecen este fenómeno (Lin y Yuanzhi, 2011 y Do Brito *et al.*, 2015).

En este contexto, el presente proyecto es una propuesta para la investigación de la ICU en el área de estudio dentro de Lima Metropolitana y la determinación de su relación con algunas variables demográficas, espaciales y atmosféricas, utilizando imágenes satelitales. De esta manera se espera proporcionar información relevante para la planificación urbana de Lima Metropolitana.

Objetivo principal:

Determinar la presencia de la Isla de calor urbano en Lima Metropolitana, usando sensores remotos, además establecer su relación con factores demográficos, espaciales y ambientales.

Objetivos específicos:

- Determinar la intensidad de la isla de calor urbano en el área de estudio usando imágenes del satélite Landsat 8.
- Establecer relaciones entre la intensidad de la isla de calor urbano con la elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI), y uso del suelo.
- Establecer relaciones entre la intensidad de la isla de calor urbano y los contaminantes atmosféricos NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Desde hace varias décadas, distintas áreas urbanas han sido consideradas como Islas de calor urbano (ICU), en donde la temperatura del aire y la superficie son más calientes que sus alrededores rurales. Este fenómeno ha sido encontrado en varias ciudades de todo el mundo. El primer investigador en señalar la diferencia entre la temperatura del aire en una zona urbana y sus alrededores rurales fue Luke Howard en 1818 (Gartland, 2008), en donde señaló la presencia de exceso de calor artificial en Londres.

A continuación se presentarán las causas de la ICU, las consecuencias, medios para mitigar este fenómeno, un indicador para evaluar este evento y los métodos con los que se evalúa, haciendo especial énfasis en el procesamiento de información satelital para hallar el indicador de la ICU.

2.1. FACTORES QUE INFLUENCIAN A LA PRESENCIA DE LA ICU

Según Rizwan *et al.* (2008) el efecto ICU es generado por diferentes variables, las cuales pueden ser divididas en dos grupos, controlables y no controlables (Vea la Figura 1). Las primeras son aquellas relacionadas al desarrollo y planificación urbana, las que podrían ser modificadas por las personas. El segundo tipo, son los factores que no pueden ser controlados, como las variables climáticas: velocidad del viento, cobertura de nubes, entre otros factores ligados al medio ambiente.

Según Rizwan *et al.* (2008) y EPA (2009) el proceso que origina el efecto ICU ocurre de la siguiente manera. La energía generada y contenida en una área urbana proviene principalmente del sol y de fuentes antropogénicas (plantas generadoras de energía, automóviles y aires acondicionados). Ésta última fuente calienta el aire ambiental directamente. Mientras que la primera se divide en dos, una fracción que calienta el aire ambiental y otra que es absorbida por las estructuras urbanas las que posteriormente también calentarán el aire ambiental. Durante el día la energía solar y la antropogénica calientan el medio ambiente. La radiación solar cede energía a las estructuras como paredes techos,

jardines, parques y áreas pavimentadas, las que absorben y almacenan el calor de manera diferente. Luego, cuando el sol se va poniendo, el aire ambiental comienza a enfriarse pero la energía conservada dentro de las estructuras es liberada a la atmósfera.

Según EPA (2009) esta transferencia de energía es afectada no solo por el tipo de materiales de las estructuras urbanas, también tiene en cuenta otros factores como la presencia de áreas verdes y la visibilidad del cielo. Las áreas verdes como parques y jardines afectan negativamente a la ICU, debido a que enfrían el aire ambiental a través de la transpiración de la vegetación y porque tienen un mayor albedo (que las estructuras urbanas), por lo que absorbe menor energía. Además, la visibilidad del cielo influye positivamente a la ICU. En ciudades altamente pobladas y de un marcado crecimiento vertical la visibilidad del cielo es mínima y la densidad de materiales de construcción es considerablemente alta, por lo cual las ciudades retienen aún más calor. Así también, la contaminación atmosférica también afecta a la ICU, por un lado las partículas de aerosol tiene una relación negativa con esta alteración térmica, debido a que ellas absorben y reflejan las ondas largas, generando un efecto enfriador, esto es conocido como oscurecimiento global. Por otro lado, los gases de efecto invernadero contribuyen positivamente a la ICU, manteniendo un aire más caliente.

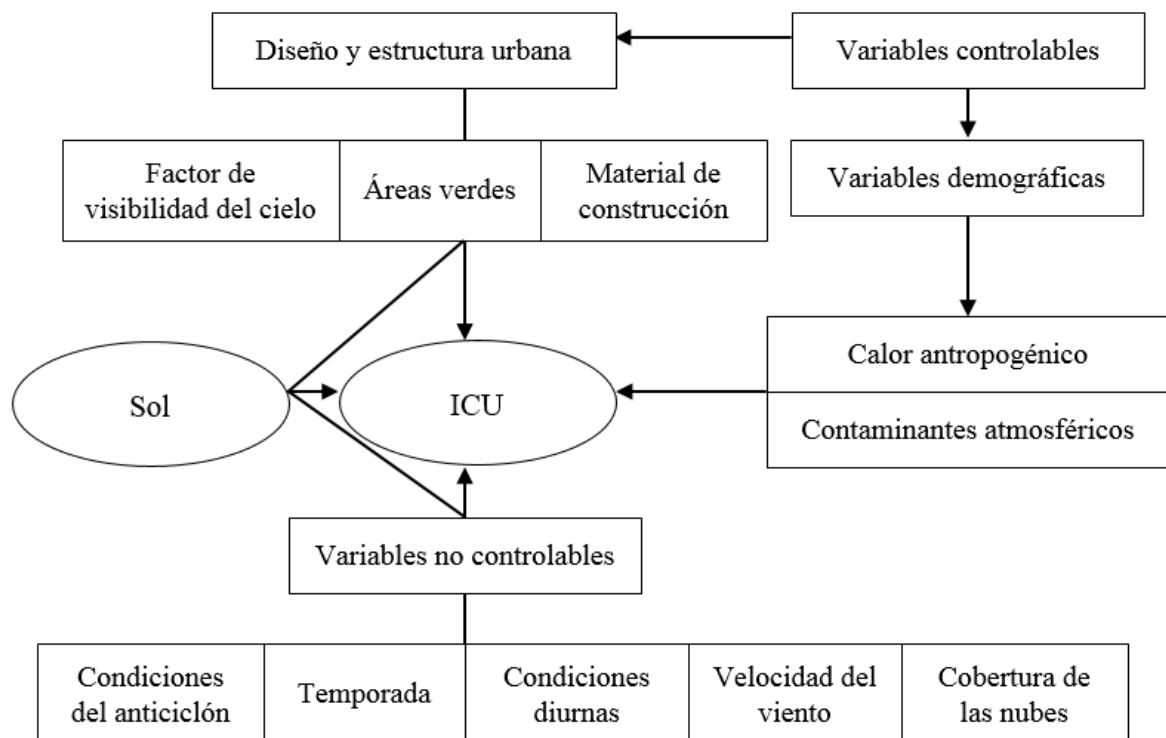


Figura 1: Variables que generan la ICU

FUENTE: Rizwan *et al.*, 2008

2.2. CONSECUENCIAS DE LA ISLA DE CALOR URBANO

Hay algunas consecuencias positivas de la ICU, tales como la disminución de la utilización de energía para calefacción en invierno o el descongelamiento de la nieve en los caminos, además prolonga el periodo de crecimiento para los cultivos (Kahalid, 2014). A pesar de esto, la ICU tiene varios impactos negativos relacionados el incremento en el consumo de energía, la calidad del aire y la salud humana (EPA, 2009).

Demanda de energía

El aumento en la temperatura ambiental durante el verano trae como consecuencia un incremento en el uso de aire acondicionado en centros comerciales, casas y oficinas, esto implica un aumento en la demanda de energía. Akbari (2005) ha señalado que la demanda de energía incrementa entre 1.5 y 2.0 por ciento por cada aumento de 0.6°C en la temperatura ambiental. Este aumento en el uso de energía es usado para compensar los efectos de la Isla de calor urbano.

Calidad del aire

El aumento en la demanda de energía ocasionado por la ICU genera presión sobre las plantas de energía. Las plantas térmicas que cubren parte de este aumento en la demanda, ocasionan un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero. De acuerdo a la EPA (2009), los principales contaminantes generados por una planta térmica son dióxido de sulfuro (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado, monóxido de carbono (CO) y mercurio (Hg). Además, el NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en la atmósfera (principalmente por el parque automotor) son precursores del ozono (O₃) estratosférico y material particulado fino. Además, Weng y Yang (2006) mencionan que hay una relación positiva entre las concentraciones de SO₂, NO_x y Polvo y la Temperatura de superficie del suelo.

Bienestar y salud de las personas

El aumento de las temperaturas diurnas y la reducción en el enfriamiento nocturno, junto con la contaminación atmosférica afectan la salud de las personas, esto incluye malestar general, complicaciones respiratorias, insolación, agotamiento y mortalidad relacionada con

las olas de calor. Las Islas de calor también pueden exacerbar el impacto de las olas de calor, los que son períodos anormalmente calientes y a menudo húmedos. Estos eventos son particularmente peligrosos y pueden dar lugar a tasas superiores a la media de la mortalidad. El Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades de EEUU estimó que entre 1979-1999 la exposición al calor excesivo contribuyó a más de 8.000 muertes prematuras en Estados Unidos (EPA, 2009).

2.3. MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO

Rizwan *et al.* (2008) recopiló información sobre medidas propuestas para mitigar los efectos negativos de la ICU. Las medidas de mitigación en fueron clasificados como: (i) aquellos relacionados con la reducción de liberación de calor antropogénico (por ejemplo, apagar aparatos de aire acondicionado); (ii) aquellos relacionados a un mejor diseño del techo (por ejemplo, los techos verdes, enfriamiento por pulverización de techos, techos reflectantes, etc.); (iii) otros factores de diseño (por ejemplo, humidificación, el aumento del albedo de superficies, etc.).

2.4. INDICADOR DE LA ICU: INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO

El indicador más utilizado para evaluar la ICU es la Intensidad de la ICU, el cual hace referencia a la distribución espacial de la diferencia entre la temperatura de la zona urbana y aquella de la zona rural (Rizwan *et al.*, 2008; Oke, 1987; Magge *et al.*, 1999 y Oke, 1976):

$$IICU = T_{urbana} - T_{rural} \quad (1)$$

donde $IICU$ es la Intensidad de la isla de calor urbano, T_{urbana} es la temperatura de la zona urbana y T_{rural} es la temperatura de la zona rural.

Para conocer la temperatura y así evaluar la ICU (usando la IICU) Rizwan *et al.* (2008) ha señalado varios métodos: (i) la utilización de un automóvil para recoger la data de temperatura, (ii) la recolección de información de estaciones meteorológicas, (iii) el procesamiento de información satelital para obtener valores de temperatura y (iv) el modelamiento numérico de variables meteorológicas, demográficas, entre otras. Otros indicadores son la Intensidad de la ICU media y máxima, son las diferencias entre las medidas de temperatura media y máxima de las zonas urbana y rural (Rizwan *et al.*, 2008).

2.5. SENSORAMIENTO REMOTO

El sensoramiento remoto es la ciencia de adquisición de información de la superficie de la Tierra sin estar realmente en contacto con ella. Esto se logra mediante la detección y el registro de la energía reflejada o emitida por el cuerpo estudiado, y además el procesamiento, el análisis, y la aplicación de esa información (NRCAN, 2014). Los satélites son una herramienta para lograr obtener este tipo de información. Como se dijo previamente, el sensoramiento remoto es uno de los métodos con los que se evalúa la intensidad de la ICU.

2.5.1. INFORMACIÓN SATELITAL

2.5.1.a. LANDSAT

El proyecto Landsat es una serie de satélites que orbitan la Tierra para observarla. La primera misión fue lanzada en julio de 1972, con el satélite Landsat 1 (originalmente llamado *Earth Resources Technology Satellite*). Desde esa fecha hasta la actualidad, el proyecto ha recopilado, almacenado y distribuido imágenes satelitales de la Tierra. Además, cuenta con el archivo más antiguo y continuo de imágenes satelitales terrestres. Tiene aplicaciones en distintos campos: agricultura, geología, ciencias forestales, urbanismo, educación, cambio climático, entre otros (USGS, 2014a).

El periodo de actividad de los 7 satélites del proyecto Landsat es la que se observa en la Figura 2.

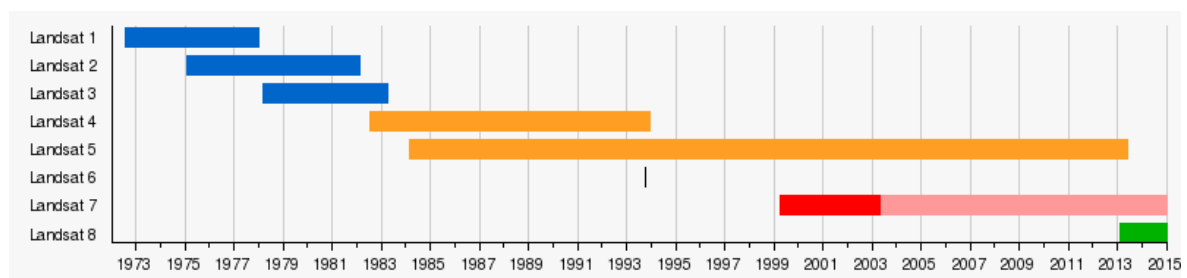


Figura 2: Línea de tiempo de los satélites Landsat

Nota: El satélite Landsat 6 falló antes de llegar a su órbita.

FUENTE: USGS, 2014b

Landsat ETM+ 8: Durante esta investigación se trabajará con imágenes de la misión Landsat 8. Este satélite fue lanzado el 11 Febrero del 2013 y sus imágenes estuvieron disponibles desde el 30 de Mayo del mismo año.

Éste satélite cuenta con dos (02) sensores: OLI (por sus siglas en inglés *Operational Land Imager*) y TIRS (por sus siglas en inglés *Thermal Infrared Sensor*). Esta misión permite al público acceder a nueve (09) bandas espectrales, con resoluciones espaciales de 15, 30 y 100m. para sus imágenes pancromáticas, multiespectrales y termales, respectivamente (Vea la Tabla 1). Las principales diferencias de las bandas de éste satélite con su predecesor, es que él cuenta con una (01) nueva banda ultra-azúl (Banda 1), una (01) nueva banda para la detección de cirrus (Banda 9) y dos (02) bandas termales (Bandas 10 y 11) en lugar de solo una (01) banda termal como en el Landsat 7 (USGS, 2014b).

Tabla 1: Bandas del Landsat 8

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 – Aerosol de la costa	0.43 - 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de onda corta (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30
Banda 8 – Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS 1)	10.60 - 11.19	100 * (30)
Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS 2)	11.50 - 12.51	100 * (30)

Nota (*): Las bandas TIRS son adquiridas con una resolución de 100 m., pero son remuestreados a 30 m. para el producto final.

FUENTE: USGS, 2014b

2.5.1.b. ASTER GDEM

Las imágenes GDEM (por sus siglas en inglés *Global Digital Elevation Model*) del sensor ASTER entregan información topográfica de la superficie de la Tierra. La NASA de

EEUU y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón distribuyen libremente este producto, el cual se encuentra en formato *GeoTIFF*, con coordenadas geográficas long/lat, referenciado con el geoido WGS84/EGM96 y una resolución espacial de 30m (USGS, 2014a).

Cabe mencionar que ASTER (por sus siglas en inglés *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) es uno de los sensores del satélite Terra, lanzado a la órbita de la Tierra por la NASA en 1999. Este sensor toma imágenes de alta resolución en 14 bandas del espectro electromagnético, las que incluyen desde el rango visible hasta el infrarrojo termal. La información ASTER es utilizada para crear mapas de temperatura, emisividad, reflectancia y elevación.

2.5.2. CORRECCIONES DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Luego de obtener las imágenes satelitales es necesario corregirlas. Durante el proceso de corrección se busca eliminar cualquier anomalía presente en las imágenes, producto de una adquisición, emisión o recepción defectuosas. De manera que se disponga la información de una manera adecuada para su interpretación. Las principales fuentes de los errores en las imágenes satelitales proviene de (Chuvieco, 2010):

- Distorsiones originadas en la plataforma generado por pequeñas modificaciones en su velocidad u orientación.
- Distorsiones producto del efecto de la rotación de la tierra. Por ejemplo una imagen del Landsat MSS-5 se adquiere en 28s. aproximadamente., en ese tiempo la tierra se ha desplazado 8 Km. para las latitudes sub-tropicales, lo que genera una inclinación de la imagen.
- Distorsiones provocadas por el sensor, entre las cuales está la distorsión en los extremos de las imágenes de sensores de ampo campo visual como NOAA-AVHRR.
- Distorsiones a causa de la atmósfera, debido a la interacción de sus componentes, los cuales modifican la radiancia recibida por el sensor.

2.5.2.a. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS

Chuvieco (2010) señala que las correcciones radiométricas son un conjunto de técnicas que modifican los Números Digitales (ND) asociados a los *pixels* de las imágenes. Su

objetivo es acercar los ND a los valores que estarían presentes en la imagen en caso de una recepción ideal. A continuación se presentan conversiones de ND a parámetros físicos como radiancia y reflectancia.

ENVI (2013) propone que la Radiancia espectral puede ser determinada a partir del ND de las imágenes satelitales usando:

$$L_{\lambda} = a * Q_{cal} + b \quad (2)$$

donde L_{λ} es la Radiancia espectral en $W/m^2 * sr * \mu m$, Q_{cal} es el valor del pixel (ND) y los factores a y b son valores proporcionados por la metadata de la imagen. Para el caso del Landsat 8, la USGS (2014a) llama el factor a “Factor de escala multiplicativo de radiancia” el cual es diferente para cada banda y aparece en la metadata de la imagen como: RADIANCE_MULT_BAND_n, además el factor b es llamado “Factor de escala aditivo de radiancia” que también es único para cada banda y en la metadata es: RADIANCE_ADD_BAND_n.

2.5.2.b. CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

La radiación electromagnética recibida en los sensores es alterada por distintos componentes de la atmósfera. Los principales son los aerosoles y el vapor de agua, ellos dispersan la radiación transmitida entre la superficie de la tierra y el sensor. Chuvieco (2010) presenta uno de los métodos más sencillos propuestos por Campbell (1987, citado por Chuvieco, 2010) la Corrección del histograma por sus valores mínimos. Este método propone que los componentes que generan el error atmosférico son de carácter aditivo, por lo tanto al evaluar el histograma de una imagen el mínimo valor de los píxeles no es cero (00) sino un valor mayor, el cual se debe al aporte de la atmósfera. En consecuencia, se propuso restar a todos los valores ND el mínimo valor de la banda, de esta manera se desplaza el histograma hasta su origen, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$ND_{ijk}' = ND_{ijk} - ND_{min,k} \quad (3)$$

donde ND_{ijk}' es el valor corregido del *pixel* (i,j) de la banda k, ND_{ijk} es el valor original del *pixel* (i,j) de la banda k y $ND_{min,k}$ es el valor mínimo de la banda k

Chuvieco (2010) también menciona otro método que se basa en el de Campbell, pero considera que la dispersión de la energía electromagnética tiende a estar relacionada entre bandas (Chavez, 1988 y Chavez, 1989 citados por Chuvieco, 2010). Aquí se propone definir una banda de referencia, la cual es la más afectada por la dispersión. A partir del mínimo valor

de la banda seleccionada se calcula la corrección atmosférica para las demás bandas utilizando los valores de calibración de la banda y las condiciones atmosféricas del momento en que se tomó la imagen.

Los dos métodos mencionados anteriormente están incluidos en los métodos de corrección atmosférica del *software* ENVI 5.1. En este programa se tienen los siguientes métodos de corrección atmosférica (ENVI, 2013):

- **Substracción oscura (*Dark Subtraction*):** En este método al valor de ND se le puede restar el mínimo valor de ND de la banda, un valor promedio definido en base a una zona de interés o un valor fijo.
- **Calibración lineal empírica (*Empirical Line Calibration*):** Se obtiene la data espectral ajustando los valores de la imagen a valores de reflectancia espectral de campo, laboratorio o de otros valores referenciales como aquellos en librerías espectrales.
- **FLAASH[®] (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*):** Es un método de corrección atmosférica de sensores hiperspectrales y multiespectrales que corrige bandas que incluyen el espectro visible, el infrarrojo cercano e infrarrojo cercano de onda corta, hasta 3 μm . (no incluye regiones termales). FLAASH toma en cuenta el efecto de las partículas principales de la atmósfera, el vapor de agua o los aerosoles, lo cual es posible utilizando bandas espectrales específicas.
- **Calibración de campo plana (*Flat Field Calibration*):** Normaliza imágenes hiperspectrales utilizando un área de reflectancia conocida o reflectancia “plana”. El espectro promedio de la zona definida es utilizada como el espectro de referencia, el cual es dividido entre el espectro de cada *pixel* de la imagen.
- **Corrección atmosférica térmica (*Thermal Atmospheric Correction*):** Este método es utilizado para eliminar el efecto atmosférico en bandas dentro del espectro infrarrojo térmico (8 - 14 μm). Este algoritmo supone que en la escena existe una superficie de características similares a la de un cuerpo negro. Éste algoritmo usa como referencia la longitud de onda en la cual aparece más a menudo la temperatura de brillo máxima (el cual corresponde al cuerpo negro). A partir de ella se calculan los valores de compensación para la corrección.

2.5.2.c. CONVERSIÓN DE ND A PARÁMETROS FÍSICOS

Chuvieco (2010) señala que si se desea trabajar con medidas radiométricas relativas, comparando los parámetros únicamente entre los valores de una misma imagen, no es

necesario convertir los ND a parámetros físicos. De lo contrario, si se desea obtener valores absolutos y comparables con otras medidas, es imprescindible realizar este paso. Por ejemplo, para los casos en donde se quiera saber qué zona tiene más vegetación dentro de una misma imagen, no es necesario realizar este paso. Sin embargo, para determinar la cantidad de fitoplancton o la Temperatura de la superficie del suelo, y/o compararla con otras mediciones tomadas en campo, es necesario convertir el ND a parámetros físicos, como se vio en la ecuación (2) y se verá en las ecuaciones (3) y (4).

ENVI (2013) propone fórmulas generales para convertir la Radiancia espectral (que es obtenida a partir del ND con la ecuación (2) a Reflectancia o Temperatura de brillo. Para convertir la Radiancia a Reflectancia se utiliza:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta} \quad (4)$$

donde ρ_{λ} es la Reflectancia al tope de la atmósfera, L_{λ} es la Radiancia espectral en $W/m^2 * sr * \mu m$, d es la Distancia entre el sol y la tierra (en unidades astronómicas), $ESUN_{\lambda}$ es la Irradiancia solar en $W/m^2 * \mu m$ y θ es la Elevación del sol en grados.

Además, para obtener Temperatura de brillo a partir de la Radiancia espectral se aplica (ENVI, 2013):

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (5)$$

donde TB es la Temperatura de brillo al tope de la Atmósfera, en Kelvin, L_{λ} es la Radiancia espectral en $W/m^2 * sr * \mu m$ y K_1 y K_2 son las constantes térmicas de conversión.

2.5.2.d. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS

La corrección geométrica es asignar la posición correcta a los *pixels* de la imagen (Chuvieco, 2010). A diferencia de la corrección radiométrica, en este proceso no se cambian los valores de ND, sino las coordenadas de los *pixels*. De esta manera se pueden transformar las coordenadas de la imagen, por ejemplo es posible convertir una imagen con coordenadas geodésicas a geográficas y viceversa. Además también permite ajustar dos o más imágenes entre sí, por ejemplo asignar las mismas coordenadas a dos imágenes.

En el caso de las imágenes Landsat 8 no es necesario realizar la corrección geométrica porque la USGS realiza este paso antes de entregarlo al público (USGS, 2014a).

2.5.3. INDICADORES ESPACIALES

Es posible procesar la información espacial mediante indicadores. De manera que a partir de imágenes tomadas del espectro visible y termal es posible conocer zonas de mayor densidad de vegetación o mayor temperatura, como veremos a continuación.

2.5.3.a. NDVI

El Índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI (por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*), es un indicador que estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. El NDVI se calcula a partir de la luz roja del espectro visible y la luz infrarroja cercana, absorbida y reflejada por la vegetación respectivamente. La vegetación sana absorbe la mayor parte de la luz visible, y refleja una pequeña parte de la luz del infrarrojo cercano. Por el contrario, la vegetación poco saludable o senescente refleja la luz más visible y menos luz en el infrarrojo cercano (Weier y Herring, 2000). Este indicador puede ser determinado por:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (6)$$

donde *IRC* son los valores de reflectividad de la banda infrarroja cercana y *R* son los valores de reflectividad de la banda roja.

Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre resultan en un número que oscila desde menos uno (-1) a más uno (1). Un valor de NDVI cercano a menos uno (-1) significa que no hay vegetación y uno cercano a uno (1) indica una alta densidad de hojas verdes (Weier y Herring, 2000).

2.5.3.b. NDBI

El Índice de edificación de diferencia normalizada o NDBI (por sus siglas en inglés *Normalized Difference Build-up Index*) representa uno de los principales tipos de cobertura del suelo, es decir, las zonas altamente construidas (Li y Liu, 2008). Además el NDBI puede ser utilizado como indicador de la extensión espacial urbana y la intensidad del desarrollo.

Este indicador puede ser determinado por:

$$NDBI = \frac{V - IRC}{V + IRC} \quad (7)$$

donde V son los valores de reflectividad de la banda verde y IRC son los valores de reflectividad de la banda infrarroja cercana.

Los valores de NDBI para un píxel dado siempre resultan en un número que oscila desde menos uno (-1) a más uno (1). Un valor de NDBI cercanas a menos uno (-1) significa que hay baja densidad de edificaciones y un valor cercano a uno (1) indica una alta densidad edificaciones.

2.5.3.c. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO

Este indicador pretende señalar la temperatura de la superficie terrestre. Para este parámetro, la superficie es lo que ve el satélite sobre la atmósfera, ella podría ser nieve, hielo, césped, el techo de un edificio, o las hojas en el dosel de un bosque. Por lo tanto, la Temperatura de la superficie del suelo no es la misma que la del aire o del suelo mismo. En el siguiente punto se presentarán métodos para estimar este valor.

2.5.4. ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE DEL SUELO

El sensor TIRS (por sus siglas en inglés *Thermal Infrared Sensor*) del satélite Landsat 8, cuenta con dos (02) bandas. Esto permite utilizar el algoritmo *Split Window* (SW), y el algoritmo *Single Channel* (SC) comúnmente utilizado en los proyectos Landsat anteriores, los cuales tenían sensores TIRS con una sola banda. Jiménez-Muñoz y su equipo (2014) proponen ambos métodos para la determinación de la temperatura de superficie a partir de las bandas térmicas del Landsat 8. Ellos señalan que el típico error medio entre los algoritmos SC y SW está por debajo de 1.5K, siendo el segundo aquel que tiene un resultado ligeramente más preciso en presencia de elevados contenidos de humedad en la atmósfera.

2.5.4.a. SINGLE CHANNEL (SC)

Jiménez-Muñoz *et al.* (2009) propuso al algoritmo SC que puede ser aplicado para determinar la Temperatura de superficie del suelo (T_S) a partir de data infrarroja termal.

$$T_S = \gamma \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [\psi_1 L_{Sensor} + \psi_2] + \psi_3 \right\} + \delta \quad (8)$$

donde ε es la emisividad de la superficie, L_{Sensor} es la radiancia en el sensor y γ, δ son parámetros definidos por lo siguiente:

$$\gamma \approx \frac{T_{Sensor}^2}{b_\gamma L_{Sensor}}; \delta \approx T_{Sensor} - \frac{T_{Sensor}^2}{b_\gamma} \quad (9)$$

donde T_{Sensor} es la temperatura de brillo en el sensor; $b_\gamma = c_2/\lambda$ (1324 para TIRS-1 y 1199 para TIRS-2); y ψ_1 , ψ_2 , y ψ_3 son funciones atmosféricas, definidas por:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L_d - \frac{L_u}{\tau}; \psi_3 = L_d \quad (10)$$

Si no se tienen los valores de los parámetros atmosféricos τ , L_u y L_d ; los valores de ψ_1 , ψ_2 , y ψ_3 se pueden obtener a partir de un arreglo polinómico de segundo orden que depende de la humedad atmosférica w .

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

donde los coeficientes c_{ij} son determinados por una simulación.

Jiménez-Muñoz y su equipo (2014) señalan que este algoritmo, SC, puede ser aplicado para cualquiera de las dos bandas TIRS. Sin embargo es recomendable utilizar sólo la banda 10 porque está ubicada en una región de menor absorción atmosférica por lo que tendrá menor interferencia producto del vapor de agua atmosférico. Con esto en cuenta, estos investigadores presentan los valores para los coeficientes c_{ij} para la banda TIRS-1 (10.9 μm) utilizando la base de datos GAPRI₄₈₃₈:

$$C = \begin{bmatrix} 0.04019 & 0.02916 & 1.01523 \\ -0.38333 & -1.50294 & 0.20324 \\ 0.00918 & 1.36072 & -0.27514 \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde la correlación linear de Pearson fue mayor que 0.98 para las tres funciones atmosféricas.

Para poder aplicar el SC, además de tener la información de la banda TIRS-1 es necesario conocer la Emisividad de la superficie del suelo y el Vapor de agua atmosféricos en el momento en el que pasó el satélite. Los métodos para determinar estas dos variables se presentan más adelante.

2.5.4.b. *SPLIT WINDOW (SW)*

La base de la técnica para la determinación de la Temperatura de la superficie del suelo es la diferencia en la absorción de las dos longitudes de onda diferentes. De esta manera, se atenúan el efecto de la absorción atmosférica. El algoritmo SW fue propuesto por Sobrino *et al.* (1996) para el satélite AVHRR en donde se basa en la combinación de las temperaturas radiométricas de las dos bandas térmicas de este satélite. Skoković *et al.* (2014) ha calibrado

los parámetros de este algoritmo para que pueda ser aplicado a las bandas térmicas del Landsat 8:

$$T_s = T_{10} + c_1(T_{10} - T_{11}) + c_2(T_{10} - T_{11})^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\varepsilon \quad (13)$$

donde, T_s es la Temperatura de la superficie del suelo (K), c_0 a c_6 son coeficientes de SW (Vea la Tabla 2), T_{10} y T_{11} son la Temperatura de brillo de las bandas 10 y 11 (K), ε es la emisividad promedio de las bandas TIRS $(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})/2$, w es el vapor de agua atmosférico (g/cm^2) y $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de los valores de emisividad de las bandas térmicas, esto es: $\varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$.

Tabla 2: Contantes para la ecuación (13)

Constante	Valor
c_0	-0.268
c_1	1.378
c_2	0.183
c_3	54.300
c_4	-2.238
c_5	-129.200
c_6	16.400

FUENTE: Skoković *et al.*, 2014

Para poder aplicar el algoritmo SW es necesario conocer la Emisividad de la superficie del suelo y el Vapor de agua atmosférico. En los siguientes puntos se presentarán los métodos para la estimación de estos parámetros.

2.5.4.c. ESTIMACIÓN DE EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DEL SUELO PARA LOS ALGORITMOS *SINGLE-CHANEL* Y *SPLIT-WINDOW*

Los valores de emisividad del suelo varían considerablemente de una superficie a otra. Se ha encontrado que este parámetro se puede obtener utilizando el índice NDVI (Sobrino, *et al.*, 2004 y Skoković *et al.* 2014), o usando una clasificación del uso/cobertura de suelo (Yang y Lo, *et al.* 2002).

Determinación de la Emisividad de la superficie del suelo con NDVI

Sobrino *et al.* (2004) detalla la metodología para determinar la emisividad de una superficie a partir del NDVI y Skoković *et al.* (2014) modifica la metodología para que sea aplicable para las bandas del Landsat 8. De esta manera se propone obtener los valores de emisividad considerando los siguientes casos:

- NDVI < 0.2

Aquí los píxeles son considerados suelo desnudo y su emisividad es obtenida a partir de los valores de reflectividad de la banda roja (r_{OLI-B4}).

$$\varepsilon_{TIRS-1} = 0.979 - 0.046r_{OLI-B4} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{TIRS-2} = 0.982 - 0.027r_{OLI-B4} \quad (15)$$

- NDVI > 0.5

Los píxeles son considerados completamente vegetados, y por lo tanto se asume un valor constante de emisividad 0.99.

- $0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5$

En este caso, los píxeles son considerados una mezcla de suelo desnudo y vegetación y la emisividad es calculada de la siguiente manera:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_S(1 - Pv) + \varepsilon_V * Pv \quad (16)$$

donde ε_i es la emisividad para cada banda térmica, ε_S y ε_V son los valores de emisividad del suelo y vegetación y pueden ser reemplazados por los valores de la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de emisividad para ε_S y ε_V para las correspondientes bandas térmicas del Landsat 8.

Emisividad	Banda 10	Banda 11
ε_S	0.971	0.977
ε_V	0.987	0.989

FUENTE: Rajeshwari, y Mani, 2014

Entonces se obtiene la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{TIRS-1} = 0.971(1 - Pv) + 0.987 * Pv \quad (17)$$

$$\varepsilon_{TIRS-2} = 0.977(1 - Pv) + 0.989 * Pv \quad (18)$$

Además Pv es Proporción de vegetación:

$$Pv = \left[\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right]^2 \quad (19)$$

donde $NDVI_S$ y $NDVI_V$ son los valores de NDVI del suelo y la vegetación, 0.2 y 0.5, respectivamente.

Determinación de la Emisividad de la superficie del suelo con la clasificación del suelo

Otra manera de determinar la emisividad es realizando una clasificación de uso/cobertura del suelo. Para ellos se identifican clases según el tipo de suelo. Posteriormente, esta imagen es reclasificada de acuerdo a la emisividad de cada tipo de uso. Lo y Quattrochi (2003) clasificaron Atlanta en 09 (nueve) usos/coberturas de suelo, luego reclasificaron la imagen (Vea la Tabla 4), y luego realizaron un mapa de temperatura a partir de la banda térmica Landsat TM 5 (8 μm . - 14 μm .).

Tabla 4: Valores de emisividad utilizados por Lo y Quattrochi (2003) para la clasificación de uso/cobertura de suelo de Atlanta.

Usos/cobertura de suelo	Emisividad
Área urbana de alta densidad	0.94
Área urbana de baja densidad	0.95
Suelo cultivado o expuesto	0.92
Tierras de cultivo y pastizales	0.97
Parques y campos de golf	0.97
Bosque perenne	0.97
Bosque míxto	0.96
Bosques caducifoleo	0.95
Cuerpo de agua	0.99

FUENTE: Lo y Quattrochi (2003)

En otra investigación realizada por Javed, *et al.* (2012), él y su equipo calificaron la superficie de la ciudad de Delhi para obtener su temperatura y emisividad utilizando información de la banda térmica del satélite Landsat TM 7 (10.4 μm . - 12.5 μm .).

Tabla 5: Valores de emisividad utilizados por Javed, *et al.* (2012) para la clasificación de uso/cobertura de suelo de Atlanta

Usos/cobertura de suelo	Emisividad
Suelo	0.928
Gras	0.982
Asfalto	0.942
Concreto	0.937

FUENTE: Javed, *et al.* (2012)

Cabe señalar que este método de clasificación genera *raster* con valores de emisividad que no son continuos y para aplicarlo es necesario conocer la emisividad de la cobertura del suelo para la banda a utilizar.

2.5.4.d. DETERMINACIÓN DEL VAPOR DE AGUA ATMOSFÉRICO PARA LOS ALGORITMOS *SINGLE-CHANEL* Y *SPLIT-WINDOW*

Otro parámetro que es necesario determinar para la aplicación de los métodos SC y SW es el vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2). El vapor de agua atmosférico, Vapor de agua precipitable o humedad es una medida del total de agua gaseosa contenida en una columna vertical de la atmósfera. Esta variable es la cantidad absoluta de agua disuelta en el aire. Cuando se mide en unidades lineales (milímetros, mm), que es la altura (o profundidad) que el agua ocuparía si el vapor se condensa en líquido y es extendido uniformemente a través de una columna. Usando la densidad del agua, también es posible reportar el vapor de agua en $\text{kg}/\text{m}^2 = 1 \text{ mm}$ o $\text{g}/\text{cm}^2 = 10 \text{ mm}$ (*Remote Sensing Systems*, s.f.).

El Vapor de agua atmosférico puede ser calculado de las siguientes ecuaciones propuestas por Xiaolei *et al.* (2014) y Lin y Yuanzhi (2011).

Según Xiaolei *et al.* (2014):

$$e_w^* = (1.0007 + 3.46 * 10^{-6} P) x (6.1121) x (e)^{\left(\frac{17.502 T}{240.97+T}\right)} \quad (20)$$

donde e_w^* es la presión de vapor de agua (HPa), T es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y P es la presión atmosférica (HPa). Además:

$$w = e_w^* x HR \quad (21)$$

donde w es el vapor de agua atmosférico (g/cm^2) y HR es la humedad relativa.

Paralelamente, Lin y Yuanzhi (2011) propone:

$$w = 0.0981 \times \left\{ 10 \times 0.6108 \times e^{\left[\frac{17.27 \times (T_o - 273.15)}{237.3 + (T_o - 273.15)} \right]} \times HR \right\} + 0.1697 \quad (22)$$

donde w es el vapor de agua atmosférico (g/cm^2), T_o es la temperatura del aire cercana a la superficie (K) y HR es la humedad relativa.

2.5.5. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

El análisis de correlación busca determinar el grado de asociación entre dos variables, ya sean variables continuas o discretas. Los indicadores estadísticos utilizados para medir la correlación entre dos (02) variables son el coeficiente de correlación lineal (R) y el coeficiente de determinación (R^2). Es importante notar que la existencia de correlación entre variables no implica causalidad.

2.5.5.a. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL

Según Vila *et al.* (s.f.) el Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) evalúa la intensidad de la relación lineal entre dos variables, en otras palabras cuán bien se ajustan los puntos a una recta. Este parámetro oscila entre -1 y +1, en donde un valor de +1 representa una relación lineal perfecta y positiva, un valor de -1 significa una relación lineal perfecta y negativa y un valor de 0 señala la ausencia de relación lineal entre las variables, pero no implica que no haya otro tipo de relación.

2.5.5.b. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Se llama Coeficiente de determinación (R^2), al coeficiente que indica el porcentaje de ajuste que se consigue con el modelo lineal, esto quiere decir, el porcentaje de la variación de la variable dependiente que se explica a través del modelo lineal que se ha estimado (Vila *et al.*, s.f.). Este coeficiente varía entre valores de 0 y 1 o 0% y 100%, para mayores valores de porcentaje se entiende que los puntos en el gráfico de dispersión tienen un mejor ajuste a la recta de regresión. Además el Coeficiente de determinación (R^2) es igual al cuadrado del Coeficiente de correlación (R).

2.5.5.c. INFERENCIA EN EL MODELO DE REGRESIÓN (P-VALOR)

Luego de haber calculado la recta de regresión y el ajuste de los puntos con el modelo de regresión lineal, el siguiente paso consiste en analizar si el modelo de regresión es válido en el sentido de contrastar si el análisis de la variable dependiente es válido a través de la influencia de la variable independiente. Según Vila *et al.* (s.f.) si bien, para las muestras de dos (02) variables, se pueden presentar valores de Correlación lineal (R) próximos a -1 o +1, este valor no garantiza que las poblaciones también estén correlacionadas. Para lograr comprobarlo se debe evaluar si la pendiente de la recta de la regresión poblacional es significativamente diferente de cero, con lo que se comprobaría la existencia de una correlación lineal entre ambas variables poblacionales.

Para ello se evalúa la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0: \beta = 0$$

$$H_1: \beta \neq 0,$$

donde β es la pendiente de la recta de la regresión poblacional. Al calcular el p-valor se puede determinar si β es diferente de cero. Por lo que si se trabaja con una significancia de 5 por ciento y se obtiene un p-valor menor a 0.05, sería posible rechazar la hipótesis nula, por lo que sería posible afirmar que existe evidencia estadística de que la variable dependiente evaluada es una variable relevante o influye sobre la variable independiente (Vila *et al.*,s.f.).

2.5.5.d. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ESPACIAL

El análisis de la correlación espacial evalúa la relación entre dos variables espaciales (las que poseen coordenadas). Igual que en la estadística clásica, el análisis de correlación estudia variables, donde una de ellas es independiente y al menos una es dependiente.

Usualmente al trabajar con datos espaciales se tiene una gran cantidad de información, la cual es difícilmente procesada por los programas estadísticos, para ello se trabaja con una muestra. Mitchell (2011) diseñó un muestreo aleatorio estratificado para sus datos. El tamaño muestral con el que trabajó fue 0.005 por ciento, lo que representa 4 136 *pixels* del total de 2 506 728 *pixels* (Vea la Figura 3). Además, Mitchell (2011) mencionó que trabajar con una muestra mayor implicaría complicaciones para el procesamiento estadístico y aumento en el tiempo computacional.

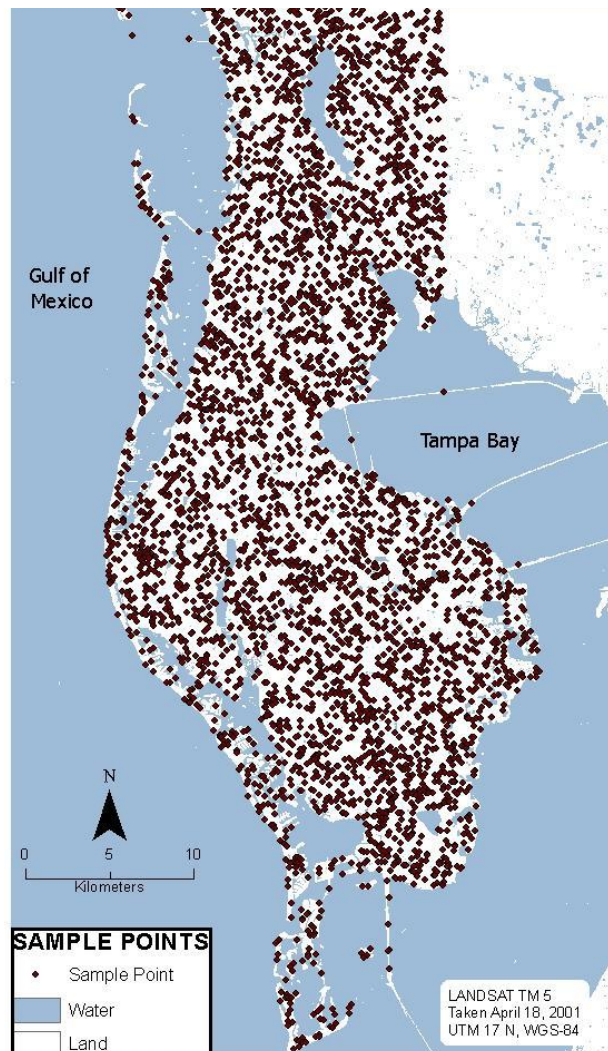


Figura 3: Puntos de muestra del estudio
 FUENTE: Mitchell (2011)

2.6.ANTECEDENTES

Se han realizado diferentes estudios para evaluar la distribución y los efectos de la ICU, en distintas ciudades del mundo. A continuación se presentan algunos estudios:

Análisis de ICU usando datos Landsat TM y ASTER: Un caso de estudio en Hong Kong

Lin y Yuanzhi (2011) evaluaron el patrón espacial de la Temperatura de la superficie del suelo en el área de Hong Kong y determinaron su relación con los indicadores espaciales NDVI y NDBI, calculados a partir de la información de las imágenes satelitales Landsat TM 5 y ASTER. Para obtener la Temperatura de la superficie del suelo se utilizaron dos (02) algoritmos los que fueron aplicados a la información térmica de los dos sensores (se usó el

algoritmo *Mono Window* para la banda termal del Landsat TM 5 y el algoritmo *Split Window* para las bandas termales del ASTER). De esta manera se determinaron los patrones espaciales de Temperatura de la superficie del suelo en el área de estudio, con los que se caracterizó el efecto local en la ICU.

Los valores de temperatura obtenidos de ambas imágenes satelitales fueron comparados con los valores de temperatura del aire, obteniendo errores menores a 1°C, sin embargo se recomendó que para futuras investigaciones se calibre con los valores de temperatura del suelo obtenidos *in situ* y durante el momento en el que pase el satélite. Además, se determinaron las correlaciones entre la Temperatura de la superficie del suelo, los índices NDVI y NDBI los cuales fueron analizados para conocer el impacto de las áreas verdes y la zonas densamente construidas sobre en la ICU.

Los resultados indicaron que el efecto de isla de calor urbano en Hong Kong se encuentra principalmente en tres áreas sub-urbanas, la isla de Kowloon, el norte de la isla de Hong Kong y el Aeropuerto Internacional de la ciudad. Los resultados del análisis de correlación mostró una correlación negativa entre la Temperatura de la superficie del suelo y el indicador NDVI, lo que sugiere que las áreas altamente vegetadas puede debilitar el efecto de ICU, mientras que se reportó una correlación positiva entre la Temperatura de la superficie del suelo y el NDBI, lo que significa que las zonas con alta densidad de construcciones fortalecen el efecto de ICU.

Análisis de la formación de la ICU en Fortaleza por medio de imágenes satelitales

Do Santos *et al.* (2013) detectó la formación de la ICU en el municipio de Fortaleza, la ciudad capital del estado de Ceará en Brasil de más de 2 millones de habitantes. En este estudio se determinó la Temperatura de la superficie del suelo utilizando la banda térmica del Landsat TM 5, en el periodo 2001 a 2007, durante la época seca. De esta manera, se obtuvieron mapas térmicos para ese periodo. En este estudio se demostró que los puntos con mayor concentración urbana se relacionan las zonas con mayores niveles de temperatura, además las zonas con menor temperatura fueron relacionadas a áreas de mayor densidad de vegetación o cuerpos de agua. Por lo tanto, se concluyó que la urbanización de esa ciudad ha contribuido a la formación de la ICU y que los factores que disminuyen su efecto son las áreas verdes y los cuerpos hídricos.

Estimación de la Temperatura de la superficie del suelo del distrito de Dindigul, usando datos de Landsat 8

Rajeshwari y Mani (2014) realizaron un estudio enfocado en aplicación del algoritmo *Split Window* donde determinaron la Temperatura de la superficie del suelo del distrito de Dindigul en el sur de la India. En este estudio, la temperatura fue determinada a partir de las dos (02) bandas térmicas del Landsat 8 utilizando el algoritmo *Split Window*. Esta metodología implica determinar la radiancia espectral y la emisividad de las bandas térmicas. Para obtener este último parámetro se utilizó un método de valor umbral basado en los valores de NDVI. Así pues se generaron mapas de NDVI, emisividad y temperatura de superficie para el área de Dindigul. A partir de esta información se concluyó que las temperaturas de la superficie altas, mayores a 50°C, fueron encontradas en regiones áridas, las temperaturas entre 40 y 45°C fueron halladas en las regiones de piedemonte y las llanuras de cultivo; y las temperaturas más bajas, menores a 32°C fueron encontradas en zonas elevadas y con alta densidad de vegetación.

Comparación urbano-rural de los parámetros meteorológicos en Łódź

Fortuniak *et al.* (2006) evaluó la diferencia en la temperatura del aire, humedad y velocidad del viento entre una zona urbana y otra rural para la ciudad de Łódź, en Polonia. La información utilizada para el estudio fue recogida de dos (02) estaciones automáticas (una ubicada en una zona urbana y la otra en una rural) para el periodo 1997 – 2002 y almacenada cada 10 min por un *dataloggers*.

En este estudio se obtuvo que bajo condiciones climáticas favorables las diferencias de temperatura más altas entre la estación urbana y rural supera 8°C. La humedad relativa fue menor en la ciudad, a veces en más de un 40 por ciento. Se encontró que las diferencias de presión de vapor de agua pueden ser positivos (hasta 5 hPa) o negativa (hasta 4 hPa). La velocidad del viento en la estación urbana fue en promedio menor, en 34 por ciento en la noche y 39 por ciento durante el día. Los vientos rurales fueron menores a 1.13 m/s y algunos valores de los vientos urbanos fueron más fuertes que las velocidades en zonas rurales. También se analizó la variación de los parámetros en períodos de 24 horas.

Los resultados mostraron importantes contrastes térmicos evidenciados principalmente en la noche. La ICU siempre se desarrolló de una manera similar, en noches calmadas y sin

nubes. Por otra parte, las diferencias de humedad urbano-rurales evolucionaron de maneras diferentes en condiciones de buen tiempo, por lo que fue muy difícil predecir qué tipo de contraste de humedad se produciría. Además, se identificaron diferencias de viento urbano-rurales, en donde se observó la atenuación media de la velocidad del viento urbano.

Estudio de isla de calor en las tierras bajas de Jacarepaguá a partir la banda térmica infrarroja del Landsat TM 5

La investigación de Do Brito *et al.* (2015) tuvo como objetivo principal la identificación de cambios térmicos en las tierras bajas de Jacarepaguá, un barrio en la zona oeste de Río de Janeiro en Brasil. La metodología aplicada incluyó la recopilación de datos meteorológicos de estaciones automáticas tomadas entre el 26 de Enero de 2010 y el 6 de Febrero del mismo año, además se utilizó una imagen satelital tomada el 15 de Febrero por el satélite Landsat TM 5. Con la data satelital se determinó la temperatura de brillo, a partir del cual se generó un mapa de temperatura. Los resultados del estudio señalaron a una tendencia de aumento de temperatura en las tierras bajas de Jacarepaguá y en el barrio Taquara, en donde se dio a conocer una intensidad de ICU de 8,2°C, siendo el barrio más urbanizado del área estudiada.

Modificaciones térmicas en la ciudad de Lima: Análisis de la presencia de Isla de Calor Urbano

Barros (2010) analizó la presencia de la ICU en distintos distritos de Lima y el Callao. Ella utilizó el método del transecto móvil para obtener datos de temperatura del aire en dos transectos uno tomado el 12 de Enero de 2009 y el otro el 19 del mismo mes. Luego, los valores fueron interpolados para generar un mapa de temperatura. Esta información fue comparada con otros valores de densidad poblacional, uso de suelo, densidad urbana, distancia a fuentes de agua y altitud. En este estudio se identificó la presencia de dos núcleos cálidos el más predominante se ubicó en Independencia y Rímac y segundo núcleo en Ate Vitarte, Santa Anita, El Agustino y San Luis. Además se identificó una relación entre la intensidad de ICU con la altitud, la densidad poblacional, la densidad urbana; siendo los tres primeros factores los que favorecieron positivamente el desarrollo de la ICU.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

Se definió el área de estudio en función al límite de Lima Metropolitana, los límites distritales y la extensión de las imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas. De esta manera se obtuvo un área que incluye los distritos de la ciudad, desde Ancón hasta Lurín.

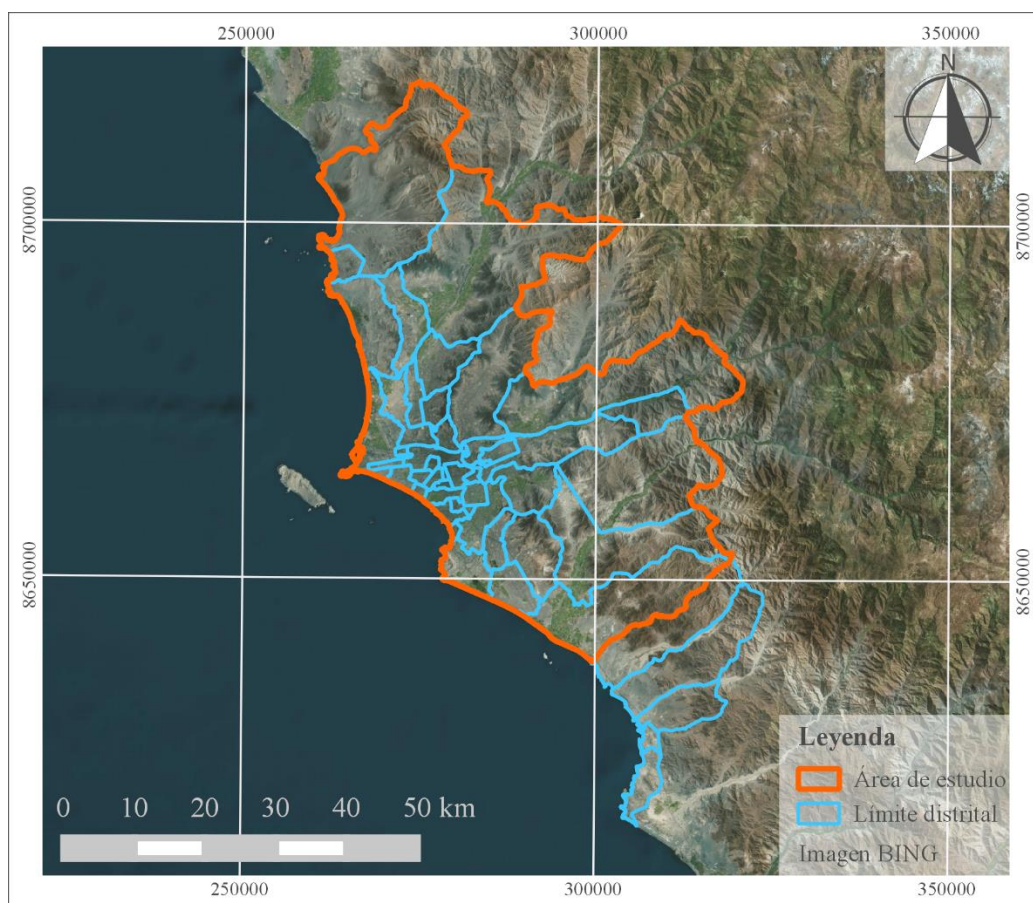


Figura 4: Área de estudio.

Elaboración propia, 2016

3.2. MATERIALES

Datos espaciales

Para esta investigación se descargaron imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 adquiridas en los veranos de 2014 y 2015, incluyendo Diciembre del 2013. Se eligió trabajar con las imágenes tomadas en verano porque es en esta época en la que hay la menor cantidad de nubes en el cielo de Lima, de manera que es posible captar imágenes satelitales con menor interferencia por nubes. Además es la época en donde la Isla de calor urbano se evidencia con mayor intensidad. Cabe mencionar que las primeras imágenes entregadas por el satélite Landsat ETM+8 fue el 30 de Mayo de 2013, por ello no se evaluaron las imágenes del verano de ese año.

En el periodo mencionado se eligieron las siguientes imágenes:

Tabla 6: Imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas en la investigación

Imagen	Fecha de adquisición	Hora de vuelo (GMT)	Hora de vuelo (Hora Perú)
LC80070682013359LGN00	25 de Diciembre de 2013	15:12:24	10:12:24
LC80070682014042LGN00	11 de Febrero de 2014	15:11:50	10:11:50
LC80070682014106LGN00	16 de Abril de 2014	15:10:53	10:10:53
LC80070682015029LGN00	29 de Enero de 2015	15:10:54	10:10:54

Elaboración propia, 2016

Además, se descargaron las imágenes satelitales de elevación ASTER GDEM para la extensión del área de estudio. También se descargaron los límites distritales, provinciales y los cuerpos de agua proporcionadas por el MINAM.

Datos meteorológicos y de calidad del aire

Se solicitó al SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) los datos de temperatura del aire y del suelo de las estaciones meteorológicas automáticas, y datos de contaminantes atmosféricos de las estaciones de calidad del aire del SENAMHI en Lima metropolitana (Vea la Tabla 7) tomados los días 25 de Diciembre de 2013, 11 de Febrero

de 2014, 16 de Abril de 2014 y 29 de Enero de 2015 a las 10:00 horas (hora aproximada de paso del satélite – Vea la Tabla 6).

Tabla 7: Estaciones del SENAMHI

Estación	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud (m.)	Tipo
Ema-Antonio Raimondi	Ancón	11° 46'	77° 09'	65	MA
Von Humbolt	La Molina	12° 05'	76° 56'	246	MA
Villa María del Triunfo	Villa María del Triunfo	12° 10'	76° 55'	292	MA CA
Ñaña	Lurigancho	11° 59'	76° 50'	523	MA
Campo de marte	Jesús María	12° 04'	77° 02'	123	MA CA
Agua azul	Carabayllo	11° 49'	76° 59'	344	MA
Ate	Ate	12° 1'	76° 55'	362	CA
San Borja	San Borja	12° 6'	77° 0'	136	CA
Santa Anita	Santa Anita	12° 2'	76° 58'	276	CA
San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	11° 58'	76° 59'	239	CA
Carabayllo	Carabayllo	11° 54'	77° 02'	190	CA
San Martín de Porres	San Martín de Porres	12° 00'	77° 05'	56	CA
Puente piedra	Puente piedra	11° 51'	77° 04'	180	CA

MA: Estación meteorológicas automáticas

CA: Estación calidad del aire

Elaboración propia, 2016

Programas informáticos

- ENVI 5.1
- QGis 2.10
- Minitab 17
- L-LDOPE

3.3. MÉTODO

3.3.1. OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes satelitales Landsat 8 de los sensores OLI y TIRS e imágenes ASTER GDEM fueron descargadas de la página web <http://reverb.echo.nasa.gov/> (Vea la Figura 5).

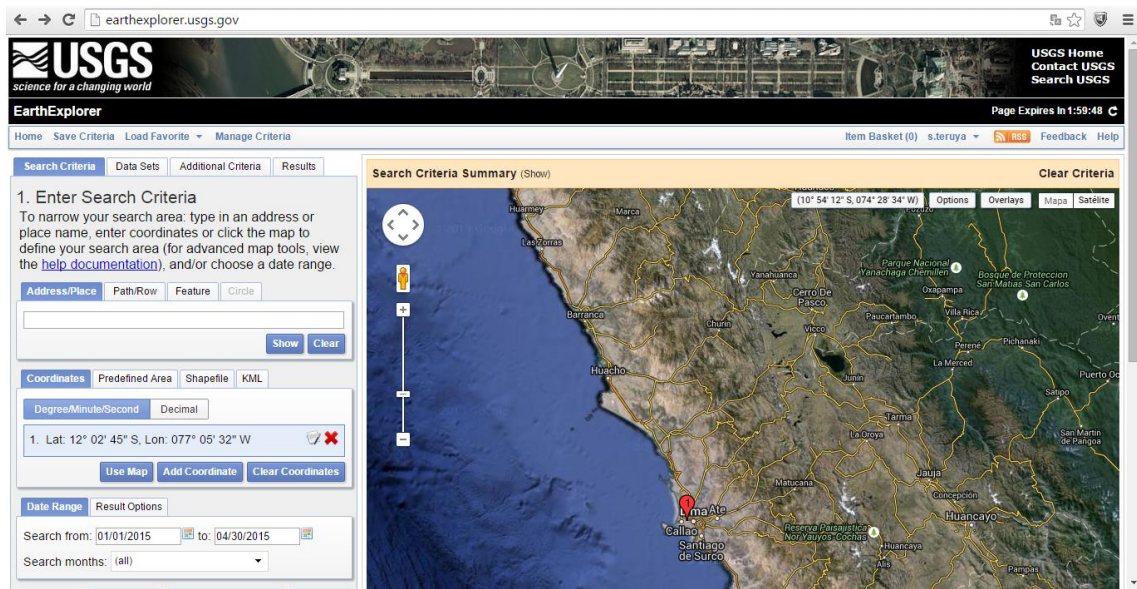


Figura 5: Plataforma de la página web <http://reverb.echo.nasa.gov/>

FUENTE: NASA, s.f.

3.3.2. DETERMINACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO

La intensidad de la Isla de calor urbano fue obtenida a partir de valores de temperatura de superficie, los cuales fueron determinados utilizando las imágenes satelitales Landsat 8 de los sensores OLI y TIRS, usando las ecuaciones (8) y (13) que corresponden a los métodos SC y SW, respectivamente.

3.3.2.a. PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN SATELITAL

Las imágenes Landsat 8, distribuidas por la NASA y la USGS son geoméricamente corregida y georreferenciada a *Universal Transversal de Mercator* (UTM) para la zona correspondiente (las imágenes utilizadas son de la zona 18S) y el *datum* WGS1984 (USGS, 2015). Por lo tanto, no fue necesaria la corrección geométrica, pero sí la radiométrica y

atmosférica. Además se le aplicó una máscara de nubes obtenida de la banda de calidad (*Quality Assessment - QA*) para evitar la perturbación que podría ser generada por las nubes.

Máscara de nubes

Se utilizaron las bandas de calidad (Banda QA) para cada una de las imágenes Landsat descargadas y el programa L-LDOPE para conocer los *pixels* que contenían nubes. Posteriormente, se utilizó el módulo *Grid masking* de QGIS para retirar la información que se encontraba en los *pixels* con nubes.

Corrección de las bandas pancromáticas (Bandas de la 1 a la 7)

Se utilizó el programa ENVI 5.1 para realizar la corrección radiométrica utilizando la función *Radiometric Calibration*, y así obtener la Radiancia de las bandas pancromáticas con las unidades $W/m^2 * sr * \mu m$.

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica utilizando el módulo *FLAASH Atmospheric Correction* con el cual se retiró el error generado por la presencia de aerosoles en la atmosfera. Para ello se indicó el modelo atmosférico *Tropical*, seleccionado de la siguiente tabla (Vea la Tabla 8).

Tabla 8: Opciones de *Atmospheric model* para el módulo *FLAASH Atmospheric Correction*

<i>Atmospheric model</i>	Vapor de agua (std atm-cm)	Vapor de agua (g/cm ²)	Temperatura del aire
<i>Sub-Arctic Winter</i>	518	0.42	-16° C
<i>Mid-Latitude Winter</i>	1060	0.85	-1° C
<i>U.S. Standard</i>	1762	1.42	15° C
<i>Sub-Arctic Summer</i>	2589	2.08	14° C
<i>Mid-Latitude Summer</i>	3636	2.92	21° C
<i>Tropical</i>	5119	4.11	27° C

FUENTE: ENVI, 2013

Cabe señalar, que la herramienta *FLAASH Atmospheric Correction* no puede ser aplicada sobre las bandas térmicas, porque es aplicable únicamente para bandas ubicadas en el espectro visible (ENVI, 2013).

Corrección de las bandas térmicas (Bandas 10 y 11)

La corrección atmosférica de las bandas térmicas no se realizó porque este paso está incluido en los algoritmos SC y SW con los que se obtuvieron las temperaturas de superficie.

3.3.2.b. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO

Luego del pre-procesamiento de las imágenes descargadas se obtuvo la temperatura de la superficie del suelo utilizando las bandas térmicas.

Para obtener la temperatura de la superficie del suelo se utilizaron y compararon los resultados de dos (02) métodos: *Single Channel (SC)* y *Split Window (SW)*. Para poder aplicar los algoritmos, previamente se determinó la emisividad (e) de la superficie, la cual fue calculada utilizando el índice de NDVI. Para ello se utilizaron las ecuaciones (6) para determinar el NDVI y de las ecuaciones (14) a la (19) para determinar la emisividad (e). Posteriormente, se aplicaron las ecuaciones (8) y (13), de los métodos SC y SW respectivamente. Todos los índices fueron calculados con el módulo *Band Math* de *ENVI 5.1*.

Los pasos mencionados anteriormente pueden ser resumidos en el siguiente diagrama de flujo (Vea la Figura 6).

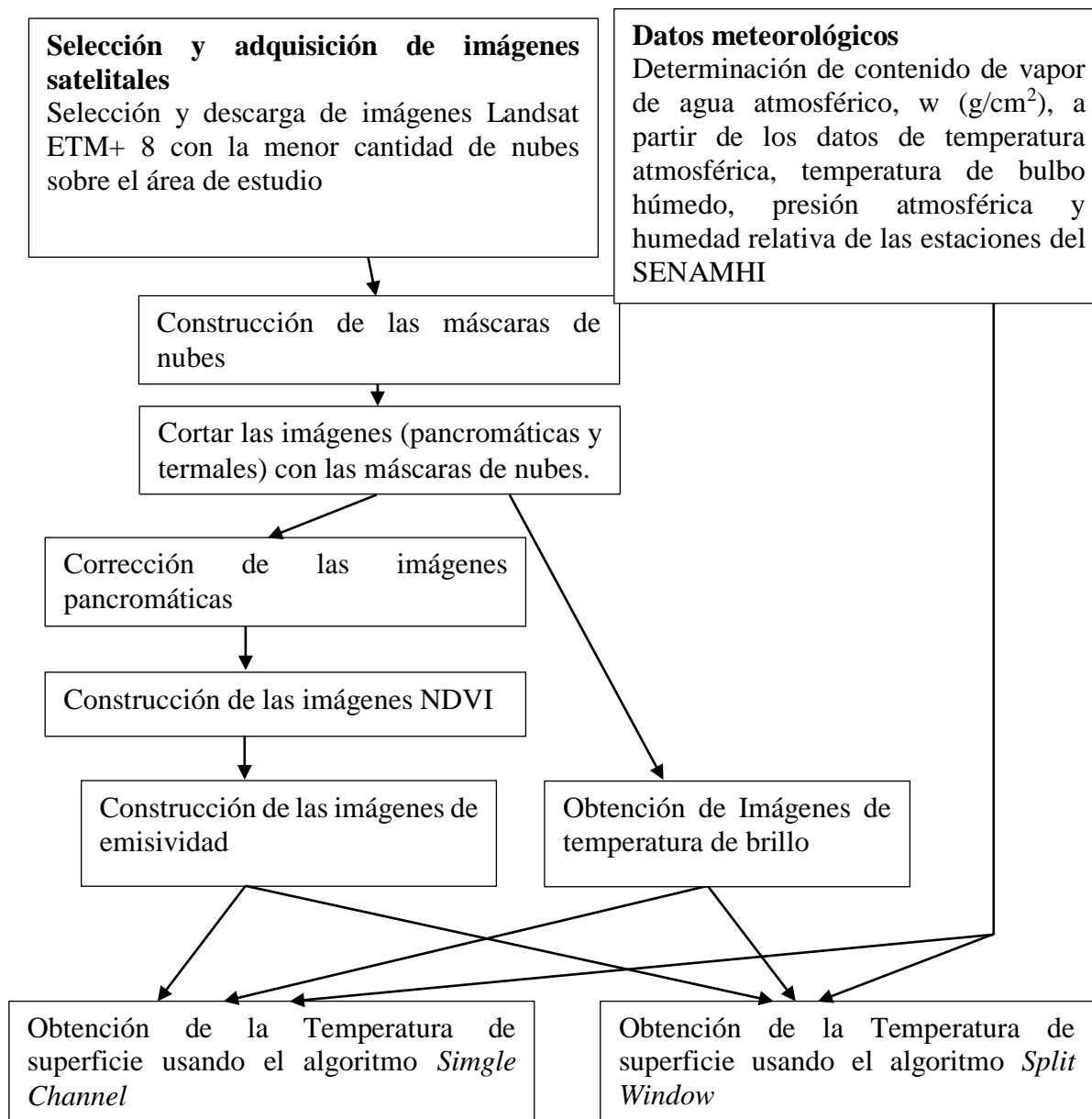


Figura 6: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 para la obtención de las imágenes de Temperatura de superficie

Elaboración propia, 2016

3.3.2.c. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS SC Y SW

Una vez que se tienen los valores de Temperatura de la superficie del suelo, se compararon estas temperaturas con las Temperaturas observadas en las estaciones agrometeorológicas del SENAMHI (Estaciones Campo de Marte y Von Humbolt). La comparación se realizó usando la prueba estadística de Kruskal-Wallis y la prueba ad hoc, usando el programa *Minitab 17*.

3.3.2.d. DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO

Una vez que se tuvieron los *rasters* de la temperatura de superficie del suelo se prosiguió a determinar los límites de la zona urbana y rural de Lima. Esto se logró usando el mapa de Peligro sísmico por tsunami elaborado por *Institut de recherche pour le développement* (2011) anexo en el informe “Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao” en donde se incluye la información de los límites de la zona urbana de Lima Metropolitana. Además, este mapa se complementó con la imagen satelital de Google.

Posteriormente se obtuvieron los valores de Intensidad de la isla de calor urbano en el área de estudio.

$$IICU = T_u - T_r \quad (23)$$

donde *IICU* es Intensidad de la isla de calor urbano, T_u es la Temperatura en la zona urbana y T_r es la Temperatura en la zona rural. Cabe señalar que el valor de T_r es la mediana de los valores de temperatura de superficie de las áreas rurales dentro del Área de estudio, los cuales están ubicados a la periferia de la ciudad de Lima Metropolitana. Este índice se determinó usando el módulo *Raster calculator* de *QGis 2.10* para la zona urbana dentro del Área de estudio.

Luego, los valores de la intensidad de ICU fueron clasificados en distintos niveles. Para ello se utilizó la categorización propuesta por Fernández (1996), mencionado por Barros (2010): Esto se realizó usando la herramienta *Reclassify* de *QGis 2.10* para recategorizar los *rasters* usando la Tabla 9.

Tabla 9: Categorización de la Intensidad de ICU según rango

Intensidad de ICU	Rango
Intensidad débil	hasta 2°C
Intensidad moderada	2 a 4°C
Intensidad fuerte	4 a 6°C
Intensidad muy fuerte	mayor a 6°C

FUENTE: Fernández (1996), mencionado por Barros (2010)

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO

3.3.3.a. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS: ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO

La densidad poblacional fue representada a nivel distrital en formato *shape file*, a partir de la información recolectada por el INEI (2014). Para la segunda variable, se generó un archivo *raster* en el que los valores de los *pixels* son la distancia entre ese punto y el cuerpo de agua más cercano, ya sea un río o el mar. Los índices NDVI y NDBI fueron calculados usando las ecuaciones (6) y (7), respectivamente.

Para determinar la variable Uso de suelo se generó un *raster*. Este se obtuvo a través del método de Clasificación supervisada usando la herramienta *ROI Tool* de *ENVI 5.1*. Ahí se definieron seis (06) áreas de entrenamiento:

- Mar
- Zona de cultivos
- Zona de parques
- Zona de suelo desnudo o inerte.
- Nubes
- Zona edificada o áreas con alta concentración de edificaciones.

Además, la elevación del área de estudio se obtuvo del *raster* ASTER GDEM.

3.3.3.b. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO

Se determinó la relación entre los valores de los *rasters* de Intensidad de la isla de calor urbano y los *rasters* de los parámetros arriba señalados utilizando *Minitab 17*. De esta manera se determinó el análisis de correlación espacial entre la Intensidad de la ICU y las variables elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, NDVI, NDBI, y uso del suelo con el objetivo de conocer si hay una relación entre ellos y en qué grado. Previamente se recogieron los valores de estos parámetros en 4 000 puntos aleatorios (0.0074 por ciento aproximadamente) dentro del área urbana (Vea el Anexo 1: Mapa de Puntos para el análisis estadístico, Figura A.1).

Antes de empezar con la determinación de las relaciones estadísticas, se recategorizó el mapa de uso de suelos utilizando los siguientes valores:

- 1: Zona de cultivos
- 2: Zona de parques
- 3: Zona de suelo desnudo inerte.
- 4: Zona edificada o áreas con alta concentración de edificaciones.

Barros (2010) estudió la relación entre la intensidad de la ICU de un área dentro de Lima Metropolitana y factores demográficos y espaciales, como la densidad urbana y el uso de suelo. Ésta información fue recopilada y calculada para los días 12 y 19 de marzo del 2009 y para las 16:00 y 19:00 horas. De esta investigación se presentaron los siguiente resultados:

Tabla 10: Valores de correlación entre la ICU y la densidad urbana y el tipo de uso de suelo

Variable	Correlación	
	16:00 horas	19:00 horas
Densidad urbana		
Alta	-0.16	0.00
Media	0.13	0.13
Baja	-0.40	-0.45
Uso de suelo		
Residencial	-0.22	-0.21
Comercial	-0.05	0.14
Equipamiento	-0.03	0.09
Industrial	0.44	0.08
Áreas verdes	-0.25	-0.19
Sin uso	-0.24	-0.56

FUENTE: Barros (2010)

3.3.4. ESTABLECER RELACIONES DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS NO, NO₂ SO₂, O₃ Y PM₁₀.

Con el programa *Minitab17* se compararon los valores puntuales de concentración de NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ con los valores de intensidad de isla de calor urbano en las fechas y ubicaciones de las estaciones de calidad atmosférica reportadas por el SENAMHI (Vea el Anexo 1: Mapa de Puntos para el análisis estadístico, Figura A.2).

Cabe señalar que las ubicaciones de las estaciones de Calidad atmosférica del SENAMHI no fueron exactas sino redondeadas al minuto (en el sistema WGS84), lo que generó un error de ubicación. Esto se corrigió comparando esta data con el “Boletín Vigilancia de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Lima y Callao”, del mes de Abril del 2016 realizado por SENAMHI.

En la bibliografía se encuentran diferentes valores de correlación entre los valores de temperatura del suelo hallados por imágenes satelitales y diferentes contaminantes atmosféricos.

Czarnecka y Nidzgorska-Lencewicz (2014) evaluaron la influencia de la intensidad de la ICU en la parte central de Gdansk (Polonia) en condiciones excesivamente calientes durante julio de 2010. El estudio determinó la relación entre los valores de concentración horaria de contaminantes: el dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, y el dióxido de azufre (SO₂) con la variación horaria de la temperatura del aire, medidos en cuatro (04) estaciones meteorológicas automáticas. En esta investigación se encontró que la isla de calor urbana tuvo una influencia estadísticamente significativa en la sensibilidad térmica medida con el uso de la temperatura efectiva. La intensidad máxima de ICU se produjo entre el distrito central (Gdańsk Wrzeszcz) y un distrito costero (Gdańsk Nowy Puerto). Aproximadamente en el 70 por ciento de los casos, la intensidad de la ICU presentó valores máximos de 1°C a 3°C, los cuales se produjeron en la mañana (07:09 horas) y en la tarde (17:08 horas). La relación entre la intensidad de ICU en julio de 2010 y la concentraciones de los contaminantes analizados fueron estadísticamente significativo (Vea la Tabla 11).

Tabla 11: Valores de Coeficiente de determinación (R²) de NO₂, O₃, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y la intensidad de ICU

Contaminante	ICU		
	CU – I	CU - P	CU - C
NO ₂	-0.11**	0.08*	0.46**
O ₃	0.16**	n.s.	-0.28**
CO	-0.13**	-0.09*	0.20**
PM ₁₀	n.s.	0.10**	0.23**
PM _{2.5}	n.s.	0.29**	0.33**
SO ₂	n.s.	0.18**	0.10*

*Estadísticamente significativa con $\alpha = 0.05$

**Estadísticamente significativa con $\alpha = 0.01$

n.s. = Estadísticamente no significativa

CU - I = IICU entre la Estación del centro urbano (CU) y la Estación del centro (I)

CU - P = IICU entre la Estación del centro urbano (CU) y la Estación del puerto (P)

CU - C = IICU entre la Estación del centro urbano (CU) y la Estación de la costa(C)

FUENTE: Czarnecka y Nidzgorska-Lencewicz (2014)

Weng y Yang (2006) investigaron la relación de las mediciones ambientales de calidad del aire y patrones de temperatura. Los parámetros usados para evaluar la contaminación atmosférica fueron el dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PTS), y el nivel de polvo de la ciudad de Guangzhou (sur de China) entre 1981 y 2000. Los datos de temperatura fueron obtenidos de imágenes Landsat TM 7. Las relaciones entre los patrones espaciales de la contaminación del aire, y las imágenes térmicas se procesaron usando programas SIG y posteriormente se realizaron análisis de correlación. Los resultados mostraron que los patrones espaciales de los contaminantes del aire se correlacionaron positivamente con valores de temperatura de la superficie terrestre por satélite derivada, sobre todo con las mediciones tomadas durante el verano (Vea la Tabla 12).

Tabla 12: Valores de coeficiente de correlación de Pearson (R) de SO₂, NO_x, polvo y la Temperatura del suelo con un nivel de significancia de 0.05

Contaminante	Temperatura de la superficie del suelo	
	1989	1997
SO ₂	0.54	0.67
NO _x	0.68	0.72
Polvo	0.36	0.44

FUENTE: Weng y Yang (2006)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO

Previa a la determinación de la temperatura del suelo de la superficie se estimó el Vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2), según las ecuaciones propuestas por dos (02) autores: Xiaolei *et al.* (2014) y Lin y Yuanzhi (2011) para las cinco (05) estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI en Lima Metropolitana. Vea la Tabla 13, donde se presentan los valores de Humedad relativa (H - %), Presión atmosférica (P – mb) y Temperatura ambiental (T - °C) reportados por estaciones del SENAMHI a las 10:00 horas (hora aproximada del paso del satélite - Vea la Tabla 6: Imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas en la investigación, para conocer la hora exacta para cada fecha) y valores vapor de agua atmosférico ($w - \text{g}/\text{cm}^2$) calculados a partir de los parámetros anteriores.

Tabla 13: Parámetros meteorológicos reportados por estaciones del SENAMHI y
Valores vapor de agua atmosférico ($w - g/cm^2$) calculado

Día	Estación	H (%)	P (mb)	T (°C)	w Xiaolei (g/cm^2)	w Lin (g/cm^2)
25/12/13	Von Humbolt	63.86	984.75	23.30	1.80	1.96
11/02/14	Von Humbolt	71.35	982.40	22.76	1.94	2.11
16/04/14	Von Humbolt	73.96	983.82	20.68	1.77	1.94
29/01/15	Von Humbolt	72.38	983.51	23.44	2.05	2.22
25/12/13	Ema-Antonio Raimondi	68.50	1007.34	22.71	1.86	2.02
11/02/14	Ema-Antonio Raimondi	77.54	1005.08	22.16	2.04	2.20
16/04/14	Ema-Antonio Raimondi	84.17	1006.74	19.44	1.87	2.03
29/01/15	Ema-Antonio Raimondi	76.00	1005.94	23.95	2.22	2.39
25/12/13	Villa María del Triunfo	76.08	982.67	21.31	1.90	2.06
11/02/14	Villa María del Triunfo	-	-	-	-	-
16/04/14	Villa María del Triunfo	80.63	981.41	19.75	1.83	1.99
29/01/15	Villa María del Triunfo	80.83	981.25	23.03	2.24	2.40
25/12/13	Campo de marte	70.67	998.64	22.28	1.87	2.03
11/02/14	Campo de marte	-	-	-	-	-
16/04/14	Campo de marte	-	-	-	-	-
29/01/15	Campo de marte	-	-	-	-	-
25/12/13	Agua azul	-	-	-	-	-
11/02/14	Agua azul	-	-	-	-	-
16/04/14	Agua azul	-	-	-	-	-
29/01/15	Agua azul	-	-	-	-	-
Mediana					1.88	2.05

w Xiaolei: Valor de vapor de agua atmosférico (g/cm^2) calculado usando la ecuación presentada por Xiaolei *et al.* (2014)

w Lin: Valor de vapor de agua atmosférico (g/cm^2) calculado usando la ecuación presentada por Lin y Yuanzhi (2011)

Elaboración propia, 2016

Para el cálculo de la temperatura de la superficie del suelo se usaron las dos (02) medianas halladas en la Tabla 13 asumiendo un valor constante de vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2) a lo largo de toda el área de estudio.

Luego del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 8 para las fechas 25 de Diciembre de 2013, 11 de Febrero de 2014, 16 de Abril de 2014 y 29 de Enero de 2015. Se obtuvieron 16 mapas de temperatura, según método (SC y SW) y ecuación de vapor de agua atmosférico (Xiaolei *et al.*, 2014 y Lin y Yuanzhi - 2011).

A continuación se muestra la Figura 7: Temperatura de la Superficie del suelo ($^{\circ}\text{C}$) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua de Xiaolei para el 25/12/2013. Para ver todos los mapas de temperatura Vea el Anexo 2: Mapas de temperaturas de superficie del suelo.

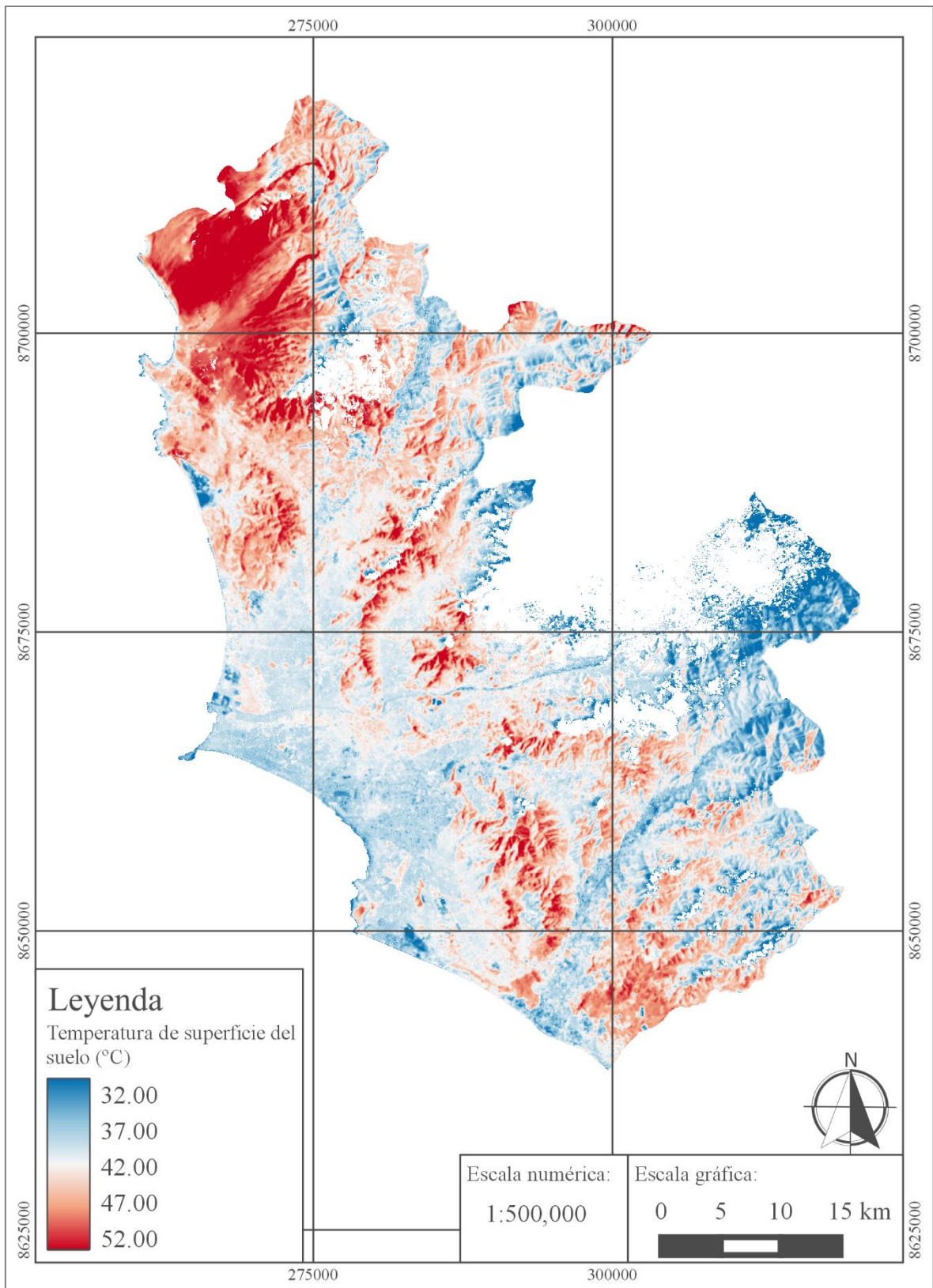


Figura 7: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua de Xiaolei para el 25/12/2013

Elaboración propia, 2016

4.2. INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO

4.2.1. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE TEMPERATURA

Comparación de los valores de temperatura obtenidas con los métodos SC y SW

La comparación con los valores de temperatura de superficie del suelo calculados obtenidos con los métodos SC y SW (usando las fórmulas para calcular el vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2), de Xiaolei *et al.* – 2014 y Lin y Yuanzhi – 2011, fueron contrastados con los datos de las temperaturas de suelo de las estaciones meteorológicas del SENAMHI (Observatorio Von Humbolt en la Molina y Campo de Marte en Jesús María). Las medidas reportadas por estas estaciones fueron temperaturas de suelo tomadas a 2 cm. de la superficie (césped) a las 7 y 13 horas recogidas los mismos días de las imágenes satelitales. Las temperaturas observadas a las 7 y 13 horas fueron interpoladas linealmente para calcular la temperatura del suelo a las 10:00 horas (hora aproximada de paso del satélite - Vea la Tabla 6, para conocer la hora exacta para cada fecha). En la Tabla 14 se muestra las temperaturas del suelo observadas en las estaciones meteorológicas, las temperaturas del suelo interpoladas a las 10:00 horas y las temperaturas de la superficie del suelo calculadas usando los algoritmos SC y SW y halladas usando las fórmulas de Xiaolei *et al.* (2014) y Lin y Yuanzhi (2011).

Tabla 14: Comparación de las temperaturas (°C) observadas y las calculadas con los métodos SC y SW.

Día	Estación	Temperatura del suelo observada a las 7am	Temperatura del suelo observada a las 1pm	Temperatura del suelo interpolada a las 10am	Temperatura del suelo calculada con SC y Xiaolei*	Temperatura del suelo calculada con SC y Lin*	Temperatura del suelo calculada con SW y Xiaolei*	Temperatura del suelo calculada con SW y Lin*
25/12/2013	Von Humbolt	22.50	30.20	26.35	19.93	18.09	40.68	40.65
25/12/2013	Campo de marte	21.60	23.80	22.70	16.99	15.06	36.25	36.23
11/02/2014	Von Humbolt	23.70	34.10	28.90	22.49	20.64	43.18	43.15
11/02/2014	Campo de marte	23.40	25.00	24.20	20.94	19.05	39.75	39.73
16/04/2014	Von Humbolt	22.80	36.60	29.70	16.28	14.21	32.93	32.90
16/04/2014	Campo de marte	21.40	24.60	23.00	15.33	13.25	31.66	31.64
29/01/2015	Von Humbolt	24.20	31.90	28.05	20.62	18.69	39.65	39.62
29/01/2015	Campo de marte	23.00	27.00	25.00	18.77	16.81	36.22	36.20
	Mediana	22.90	28.60	25.68	19.35	17.45	37.5	37.93

(*) Temperaturas (°C) calculadas a la hora de paso del satélite (10:00 horas aproximadamente) Vea la Tabla 6, para conocer la hora exacta para cada fecha.

Elaboración propia, 2016

Usando las temperaturas calculadas con los métodos SC y SW mostradas en la Tabla 14 se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. En donde:

- H_0 : la muestra sigue una distribución normal
- H_1 la muestra no sigue una distribución normal.

Esta prueba arrojó un valor de $P < 0.010$ por lo tanto con una significancia de 0.05 existe evidencia para rechazar la H_0 , en otras palabras, se puede afirmar que las temperaturas no se distribuyen normalmente (Vea la Figura 8).

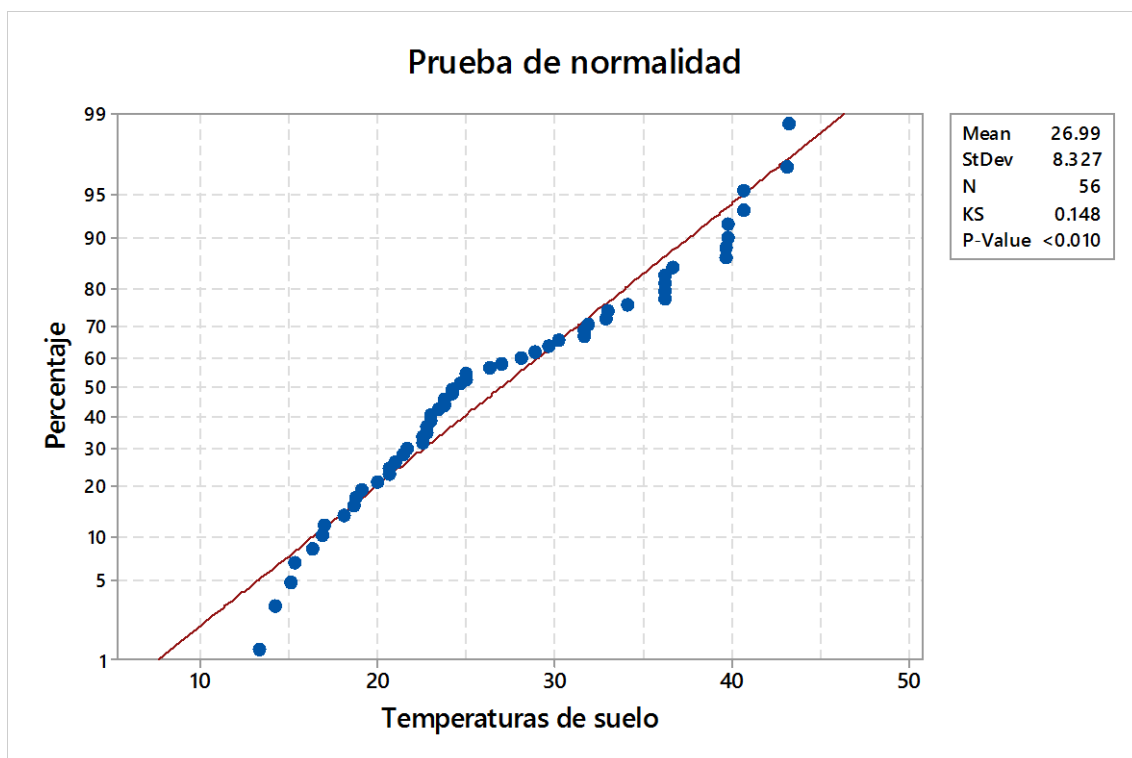


Figura 8: Resultados de la prueba de normalidad de las temperaturas.

Elaboración propia, 2016

Considerando que las temperaturas tienen un comportamiento no normal y no tienen *outliers* (Vea el Anexo 3: Boxplots de las Temperaturas para la comparación de los métodos) es posible realizar la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba considera las siguientes hipótesis:

- H_0 : no hay diferencia significativa entre las medianas de las temperaturas.
- H_1 : al menos una de las medianas es significativamente diferente.

Esta prueba arrojó un P - valor menor a 0.001 (Vea la Tabla 15)

Tabla 15: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis

Grupo	N	Mediana (°C)	Rango promedio (°C)	Z
Temperatura del suelo observada a las 7am	8	22.9	21.5	-1.31
Temperatura del suelo observada a las 1pm	8	28.6	35.8	1.37
Temperatura del suelo interpolada a las 10am	8	25.68	29.7	0.22
Temperatura del suelo calculada con SC y Xiaolei	8	19.35	10.5	-3.37
Temperatura del suelo calculada con SC y Lin	8	17.45	6.8	-4.07
Temperatura del suelo calculada con SW y Xiaolei	8	37.95	48.1	3.68
Temperatura del suelo calculada con SW y Lin	8	37.93	47.1	3.49
En general	56		28.5	

H = 49.11	DF = 6	P < 0.001
-----------	--------	-----------

Elaboración propia, 2016

El resultado de esta prueba entregó un P valor menor a 0.001, con una significancia 0.05, por lo cual se puede afirmar que existe evidencia para rechazar la H_0 , esto es, se puede afirmar que al menos una de las mediana de temperatura son significativamente diferente. Una vez que se definió esto, se prosiguió a realizar la prueba *post ad hoc* Kruskal-Wallis: Comparaciones por parejas – Prueba de Dunn, para realizar una comparación de mediana por parejas, donde se probaron las hipótesis:

- H_0 : no hay diferencia significativa entre las mediana de una pareja.
- H_1 : las medianas de una pareja son significativamente diferentes.

Para esta prueba los valores de P obtenidos fueron los siguientes (Vea la Tabla 16):

Tabla 16: Valores de P para la prueba de Kruskal-Wallis: Comparaciones por parejas – Prueba de Dunn

	7am	1pm	10am	SC_wXiaolei*	SC_wLin*	SW_wXiaolei*	SW_wLin*
7am	1.00000	*	*	*	*	*	*
1pm	0.07922	1.00000	*	*	*	*	*
10am	0.31535	0.45257	1.00000	*	*	*	*
SC_wXiaolei	0.17734	0.00191	0.01862	1.00000	*	*	*
SC_wLin	0.07047	0.00037	0.00491	0.64560	1.00000	*	*
SW_wXiaolei	0.00109	0.13106	0.02376	0.00000	0.00000	1.00000	*
SW_wLin	0.00168	0.16535	0.03248	0.00001	0.00000	0.90240	1.00000

Donde:

- 7am : Temperatura (°C) del suelo observada a las 7am
- 1pm : Temperatura (°C) del suelo observada a las 1pm
- 10am : Temperatura (°C) del suelo interpolada a las 10am
- SC_wXiaolei* : Temperatura (°C) del suelo calculada con SC y Xiaolei
- SC_wLin* : Temperatura (°C) del suelo calculada con SC y Lin
- SW_wXiaolei* : Temperatura (°C) del suelo calculada con SW y Xiaolei
- SW_wLin* : Temperatura (°C) del suelo calculada con SW y Lin

(*): Temperatura (°C) calculada para la hora del paso del satélite (10:00 horas aproximadamente)

Elaboración propia, 2016

Los resultados de la prueba Kruskal-Wallis: Comparaciones por parejas – Prueba de Dunn señaló que, con una significancia de 0.05, existe evidencia para rechazar la H_0 y por lo tanto no se puede afirmar que las medianas de una pareja son significativamente diferentes, son las siguientes parejas:

- Temperatura del suelo observada a las 7am - Temperatura del suelo observada a las 1pm
- Temperatura del suelo observada a las 7am - Temperatura del suelo interpolada a las 10am
- Temperatura del suelo observada a las 7am - Temperatura del suelo calculada con SC y Xiaolei
- Temperatura del suelo observada a las 7am - Temperatura del suelo calculada con SC y Lin
- Temperatura del suelo observada a las 1pm - Temperatura del suelo calculada con SW y Xiaolei
- Temperatura del suelo observada a las 1pm - Temperatura del suelo calculada con SW y Lin
- Temperatura del suelo calculada con SC y Xiaolei - Temperatura del suelo calculada con SC y Lin
- Temperatura del suelo calculada con SW y Xiaolei - Temperatura del suelo calculada con SW y Lin

Se esperaba que al menos uno de los métodos (SC Xiaolei, SW Lin, SC Xiaolei y SW Lin) no sea significativamente diferente a Temperatura del suelo interpolada a las 10:00 horas (hora aproximada de paso del satélite - Vea la Tabla 6: Imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas en la investigación, para conocer la hora exacta para cada fecha), sin embargo no es obtenido lo esperado. Esto puede deberse a que el valor de vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2), se aplicó como un valor constante a lo largo de todo el área de estudio y por igual en toda el área de estudio, idealmente se debería contar con varios valores de vapor de agua atmosférico distribuidos uniformemente en el área de estudio para poder interpolarlos y obtener la distribución espacial de esta variable y para cada fecha. Además se debe tener en consideración que no se ha tenido el valor de temperatura del suelo observado a las 10:00 horas, sino que este ha sido interpolado linealmente a partir de los valores observados a las 7:00 horas y 13:00 horas. Considerando que el comportamiento temporal diario de la temperatura del suelo no es lineal, esta interpolación tiene errores. Por lo tanto es difícil realizar una comparación acertada.

Calibración y validación

Debido a que no se logró determinar estadísticamente la similitud entre uno de los métodos usados y la temperatura de suelo interpolada a las 10:00horas (hora aproximada del paso del satélite - Vea la Tabla 6, para conocer la hora exacta para cada fecha), no es posible realizar la calibración y validación de las temperaturas calculadas. Esto implica que los resultados de esta investigación no podrán ser comparados con valores de temperatura de otras fuentes, sino que los resultados de temperatura obtenidos en este trabajo únicamente podrán ser comparados entre ellos mismos.

4.2.2. DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE ISLA DE CALOR URBANO

Previo a determinar los valores de Intensidad de isla de calor urbano se definieron las zonas rurales y urbanas dentro del Área de estudio. Ello se logró usando el mapa de Peligro sísmico por tsunami elaborado por *Institut de recherche pour le développement* (2011) complementado con la imagen satelital del Google.

Para obtener los valores de Intensidad de isla de calor urbano se necesitó conocer los valores de temperatura media para la zona rural (Vea la Tabla 17) para así restar este valor a los valores de temperatura de la superficie del suelo de los *rasters*.

Tabla 17: Valores promedio de temperatura de superficie del suelo (°C)
de la zona rural

	25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
Temperatura del suelo calculada con SC y Xiaolei	20.87	22.65	18.41	22.05
Temperatura del suelo calculada con SC y Lin	19.03	20.80	16.40	20.14
Temperatura del suelo calculada con SW y Xiaolei	41.24	42.512	35.35	40.84
Temperatura del suelo calculada con SW y Lin	41.22	42.48	35.32	40.80

Elaboración propia, 2016

Posteriormente se identificaron cualitativamente islas de calor y de frío en los cuatro (04) mapas de temperatura obtenidos. Estas islas de calor y de frío fueron agrupados en diez (10) zonas de evaluación donde se agrupa zonas de interés a evaluar con detalle. A continuación se presentarán los mapas obtenidos del procesamiento de la Temperatura calculada con SC y Xiaolei que representa el mismo comportamiento espacial de las otras tres (03) metodologías. A continuación se muestran los mapas de Intensidad de Isla de calor urbano y los detalles de cada grupo de islas identificado.

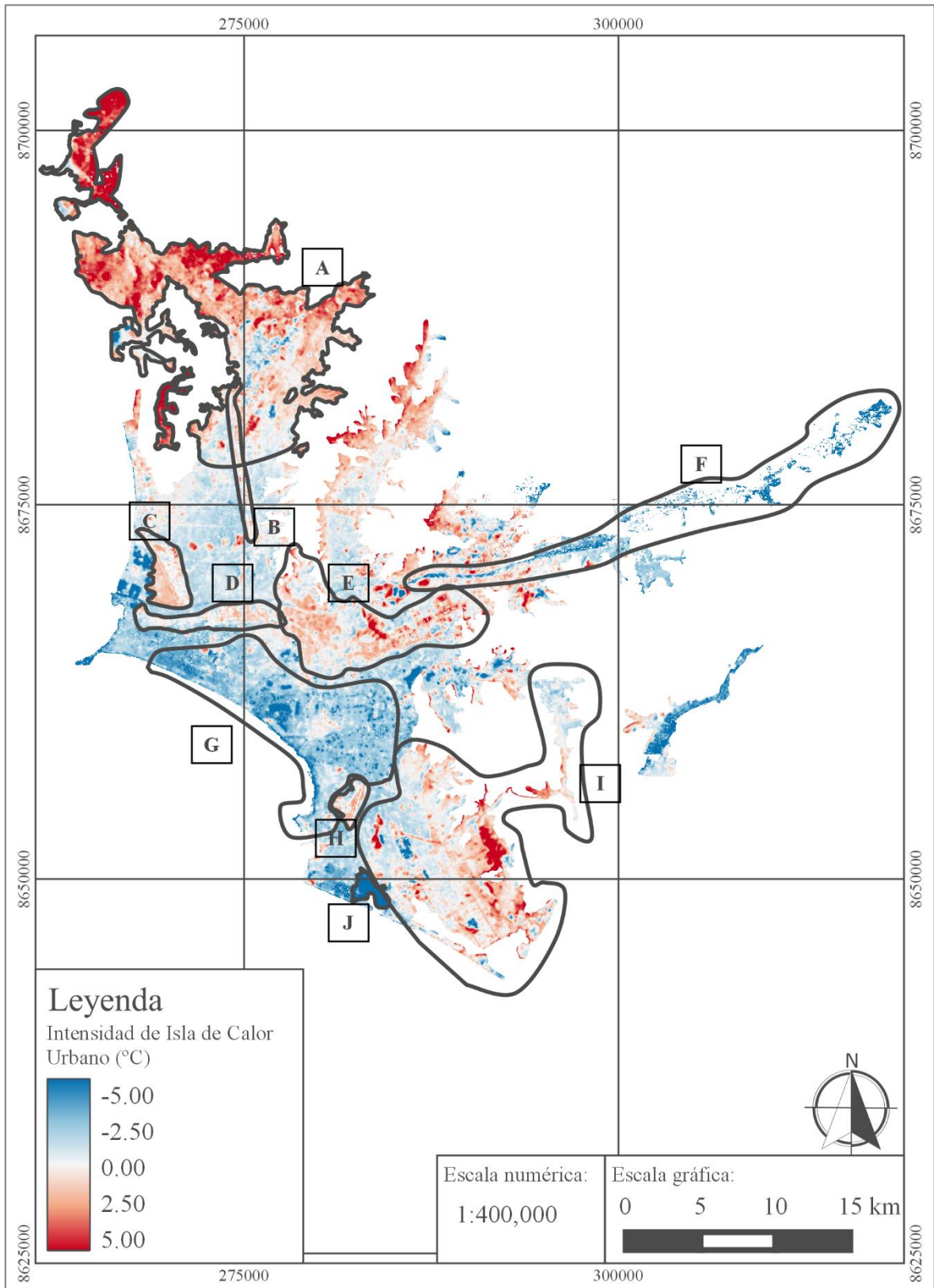


Figura 9: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 25 de Diciembre de 2013 en el Área de estudio y las diez (10) zonas de evaluación

Elaboración propia, 2016

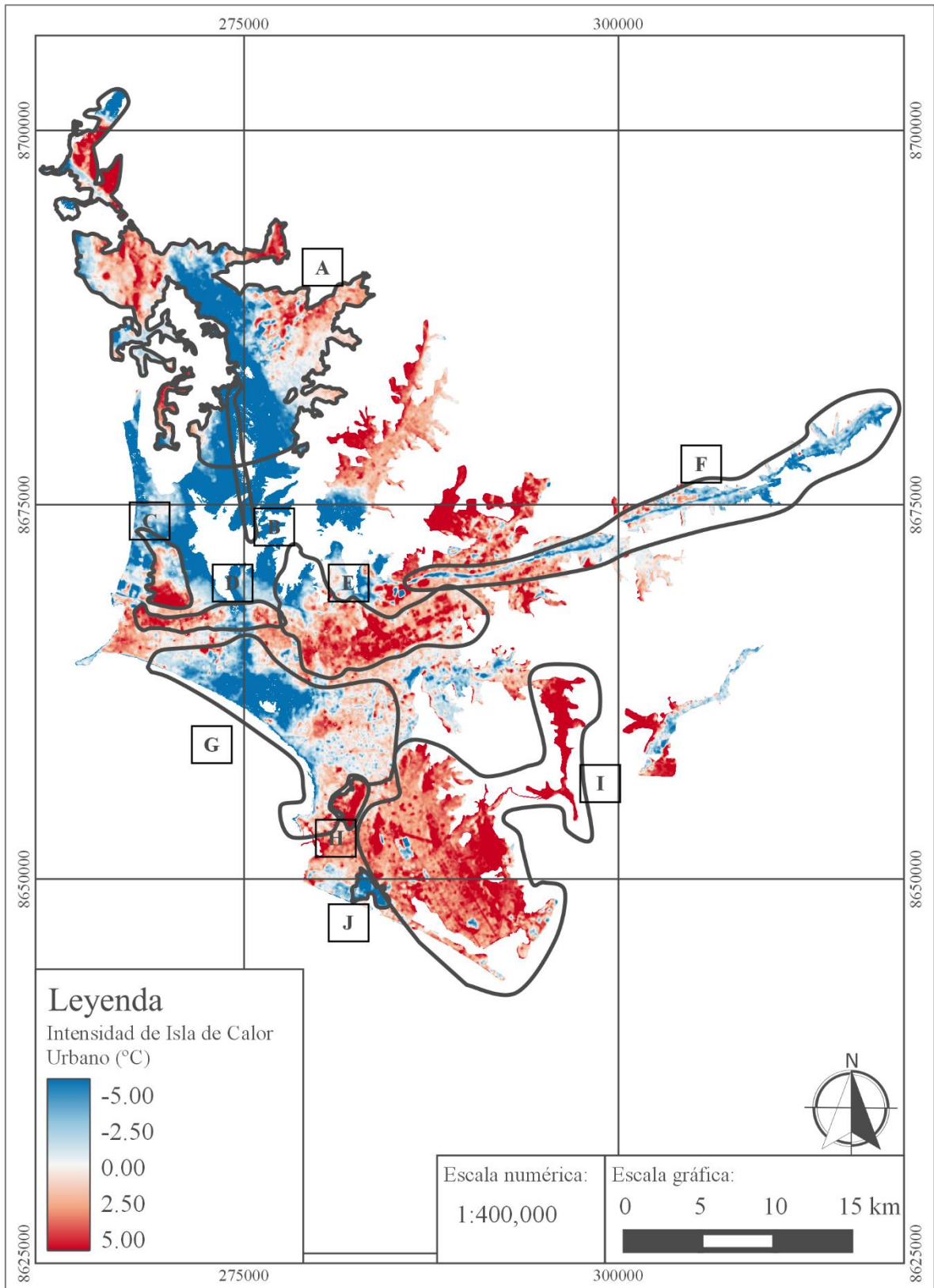


Figura 10: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 11 de Febrero de 2014 en el Área de estudio y las diez (10) zonas de evaluación

Elaboración propia, 2016.

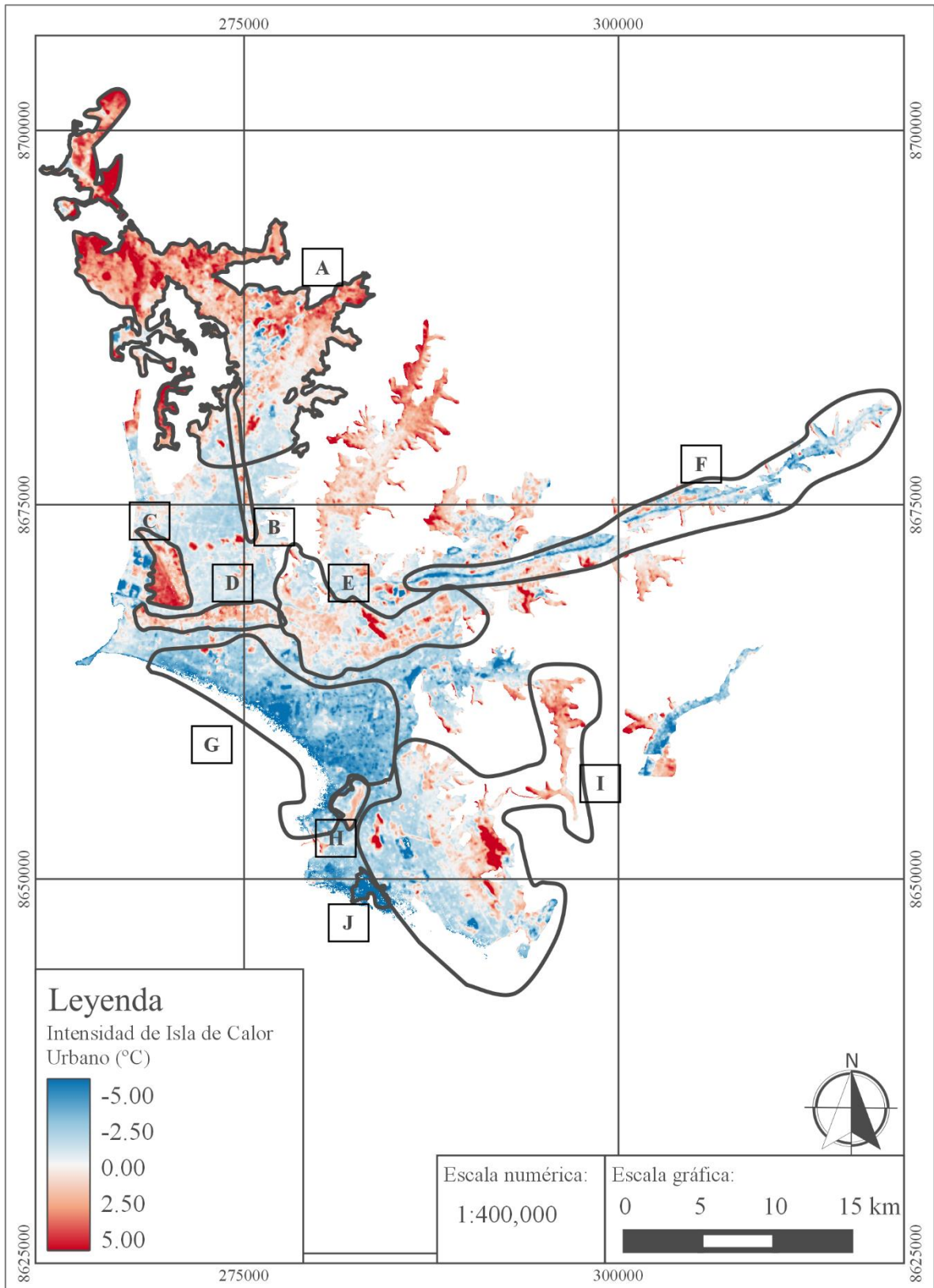


Figura 11: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 16 de Abril de 2014 en el Área de estudio y las diez (10) zonas de evaluación
Elaboración propia, 2016.

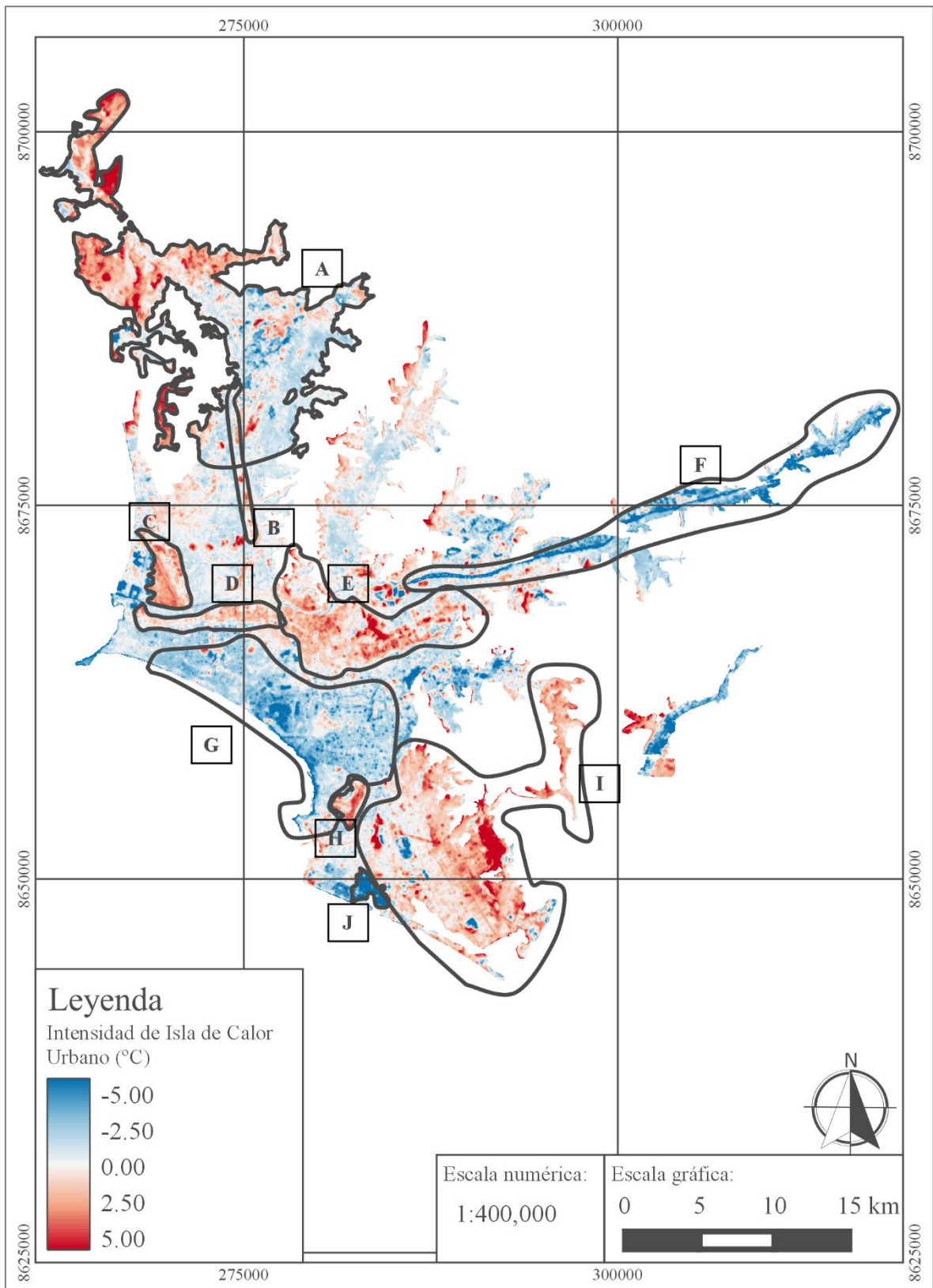


Figura 12: Intensidad de Isla de calor urbano detectada el 29 de Enero de 2015 en el Área de estudio y las diez (10) zonas de evaluación

Elaboración propia, 2016.

Zona A.: Norte de Lima Metropolitana

En la imagen de la escena tomada el 25 de Diciembre de 2013 se observó una (01) islas de calor discontinua y de intensidades muy fuerte, fuerte y moderada ubicadas en los distritos de Ancón, Santa Rosa, Ventanilla, Puente Piedra, Carabayllo y Comas. La zona de mayor intensidad (muy fuerte) se encuentra en la zona norte, en Ancón. Luego, el 11 de Febrero de 2014 se tuvo una isla de calor (de hasta intensidad muy fuerte) y de menor tamaño desplazada hacia el norte por una isla de frío en el sur (de intensidad muy fuerte) en la zona evaluada. Posteriormente, en la imagen del 16 de Abril de 2014, la isla de calor vuelve a aparecer con una distribución e intensidad similar al primer día. El 29 de Enero de 2015 se observó una isla de calor de pequeña intensidad ubicada principalmente al norte del área estudiada, desplazada hacia el norte por una isla de frío de mediana intensidad. Durante las cuatro (04) fechas evaluadas se presentamos islas de frío e intensidad variables, se presentaron durante todas las fechas evaluadas.

Los posibles factores que han podido genera la isla de calor urbano en esta zona es la presencia predominantemente de la superficie suelo desnudo, el cual por su alta capacidad térmica absorbe y emite gran cantidad de energía.

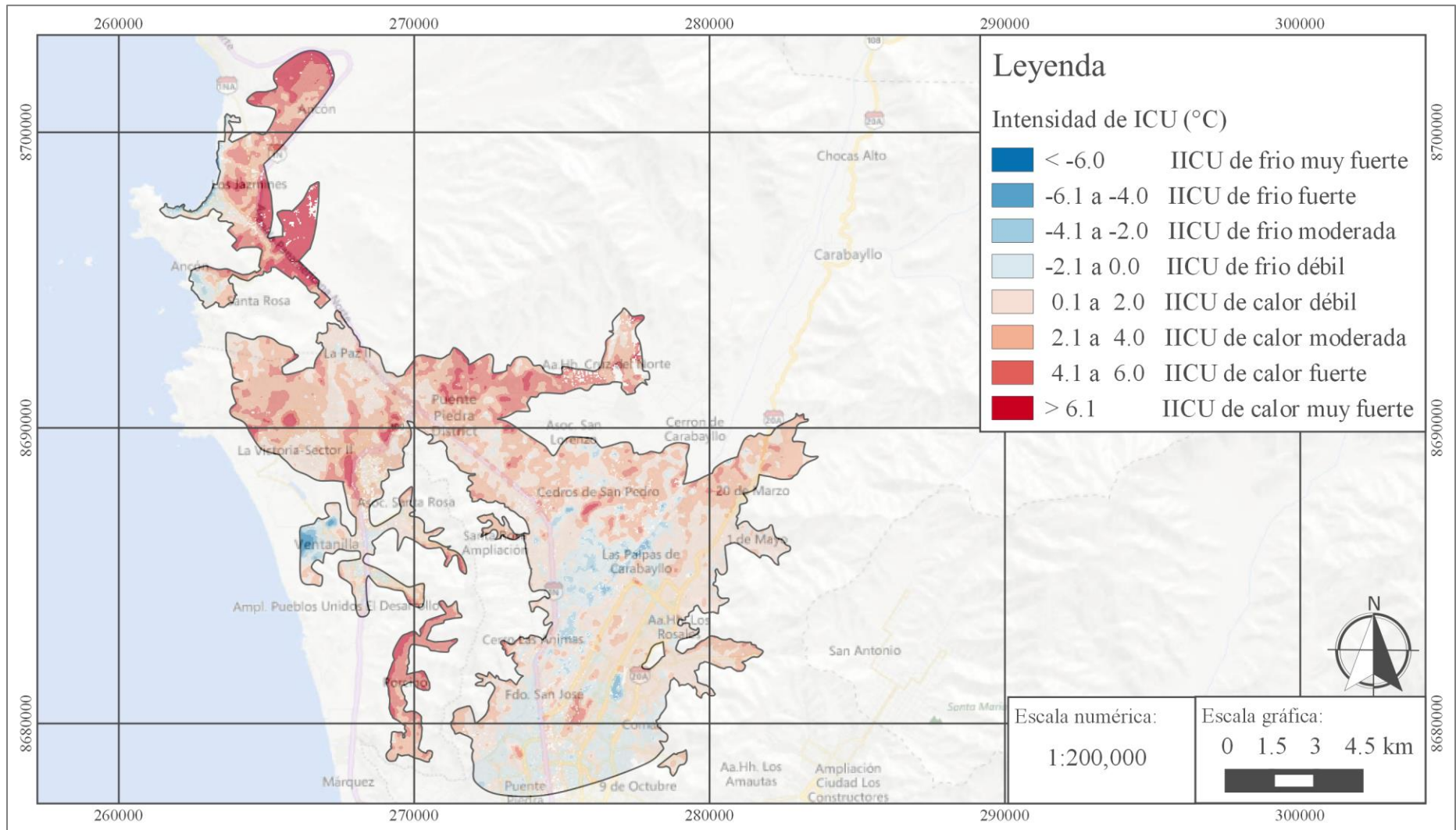


Figura 13: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona A
Elaboración propia, 2016.

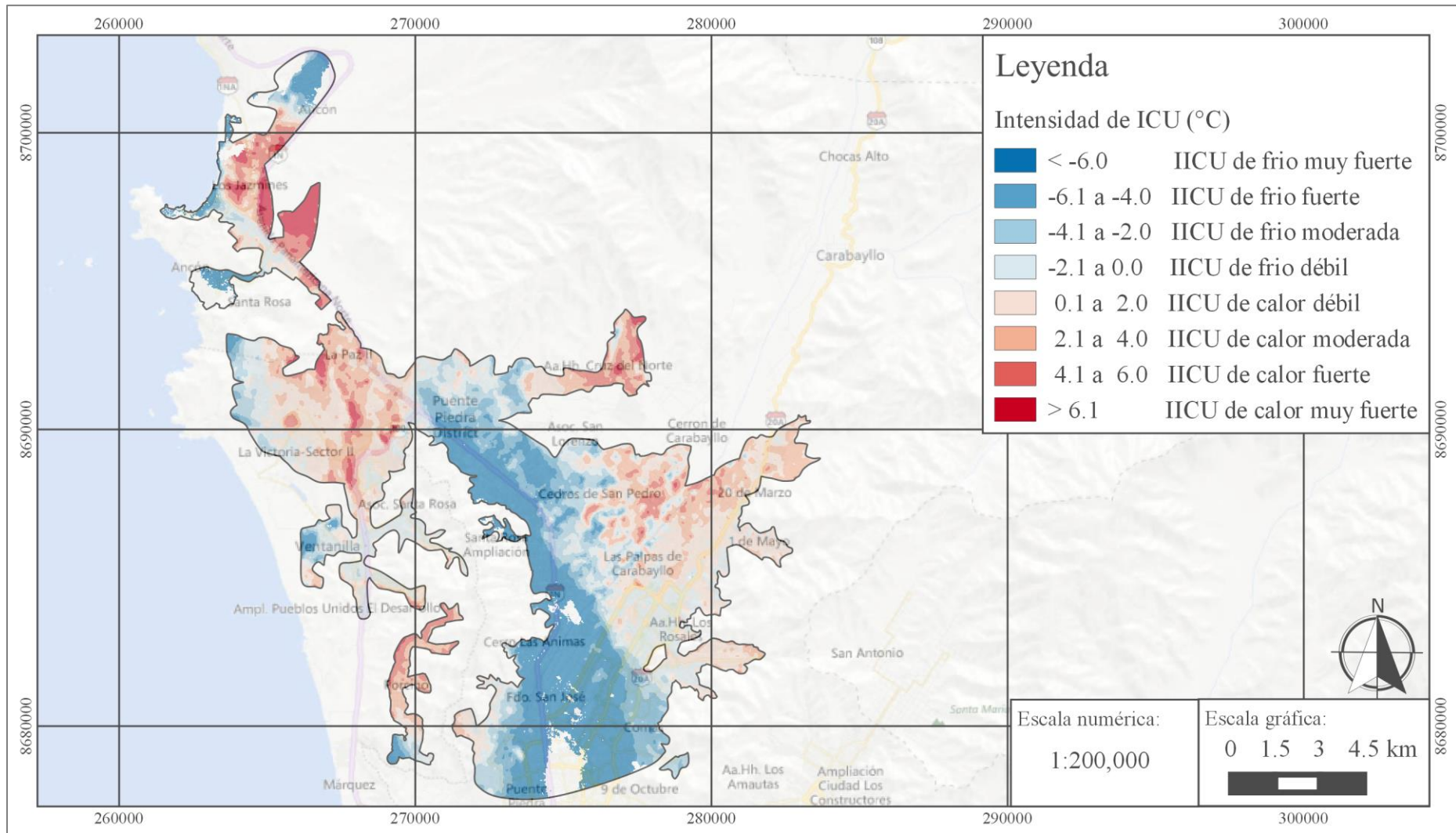


Figura 14: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona A
Elaboración propia, 2016.

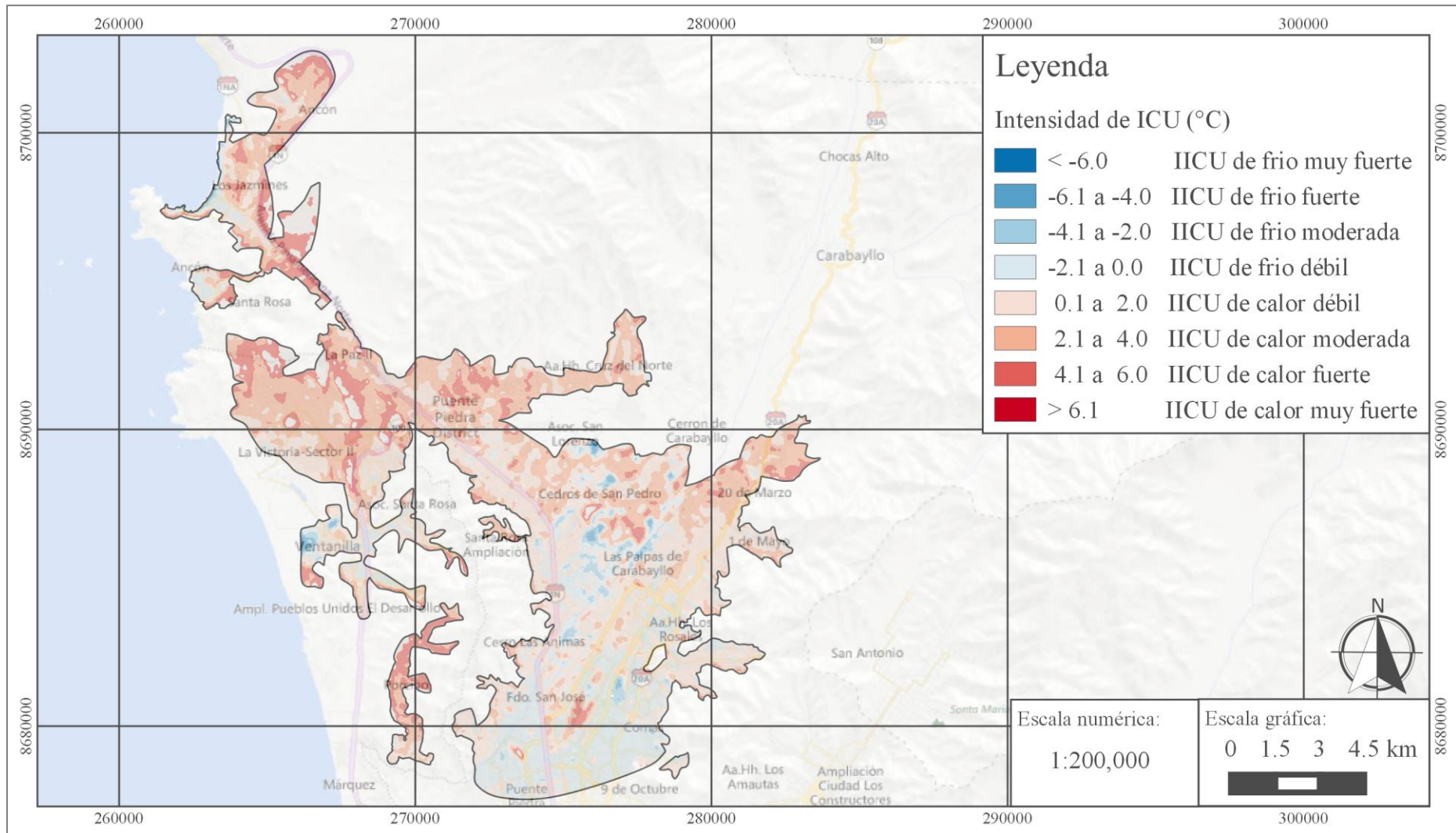


Figura 15: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona A
Elaboración propia, 2016.

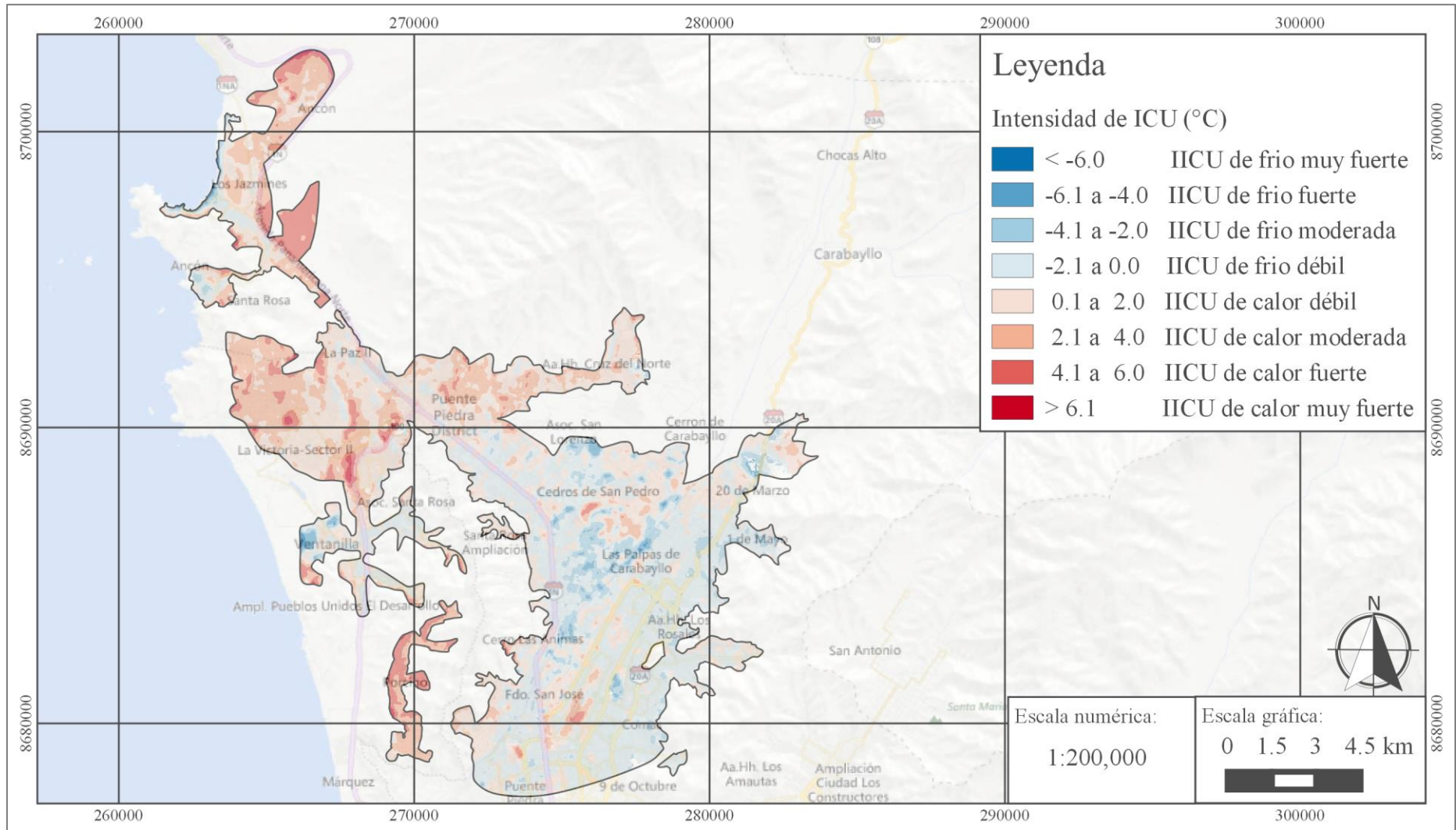


Figura 16: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona A
Elaboración propia, 2016.

Zona B.: Panamericana Norte

El 25 de Diciembre de 2013 se observaron varias islas de calor de pequeño tamaño y de hasta intensidad moderada en esta área. En la siguiente fecha, el 11 de Febrero de 2014 las islas de calor fueron desplazadas por una importante isla de frio que abarcó toda el área analizada. El 16 de Abril de 2014, volvieron aparecer las pequeñas islas de calor y aumentó la intensidad (hasta una intensidad fuerte). El 29 de Enero de 2015 se mantuvo este comportamiento. Para tres (03) de las cuatro (04) fechas se observó una pequeña isla de mediana intensidad ubicada sobre el ovalo naranjal y algunas islas sobre la zona de la panamericana norte.

Cabe señalar que uno de los posibles factores que ha generado esta isla de calor es el alto tránsito de vehículos, los cuales emiten gases de combustión y de efecto invernadero. Se debe tener en cuenta que la hora a la que pasa el satélite es a las 10:00 horas aproximadamente (Vea la Tabla 6 para conocer la hora exacta de paso del satélite para cada fecha utilizada). Esta hora se caracteriza por presentar alta congestión vehicular en la zona. Además otro factor a considerar es la baja cantidad de vegetación en el área, la cual tiene un efecto enfriador por su bajo albedo y baja capacidad térmica.

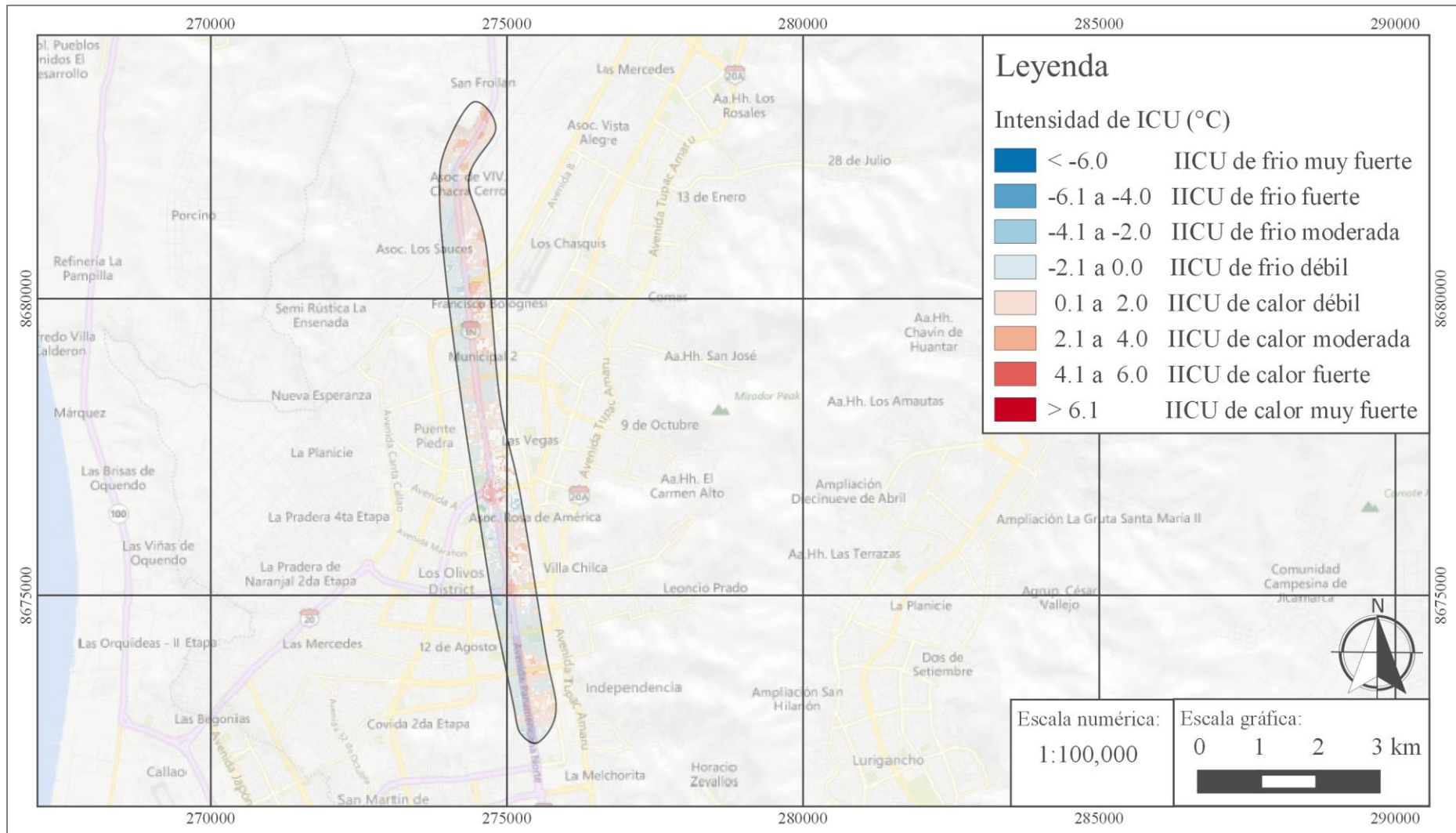


Figura 17: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona B
Elaboración propia, 2016.

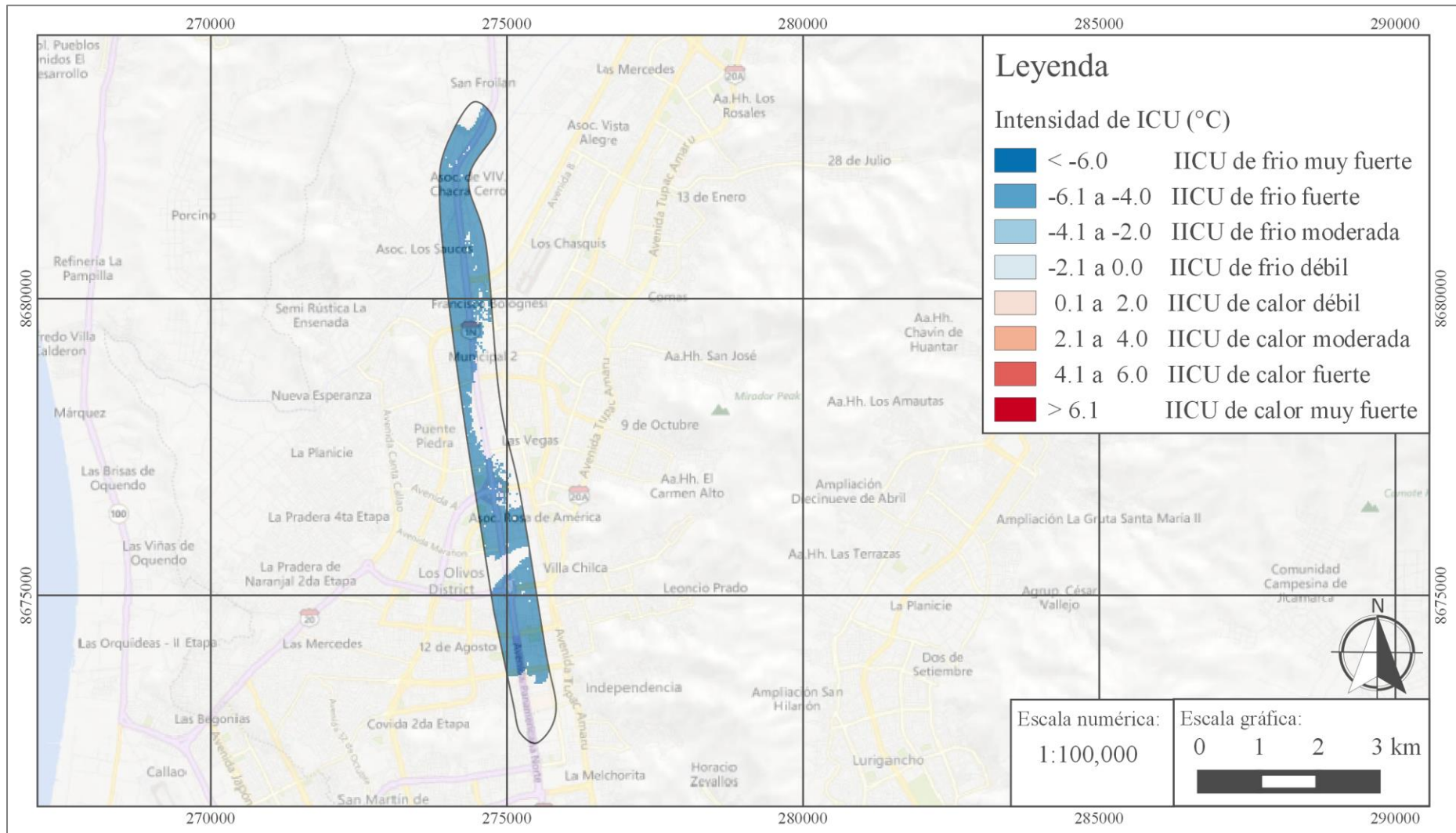


Figura 18: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona B
Elaboración propia, 2016.

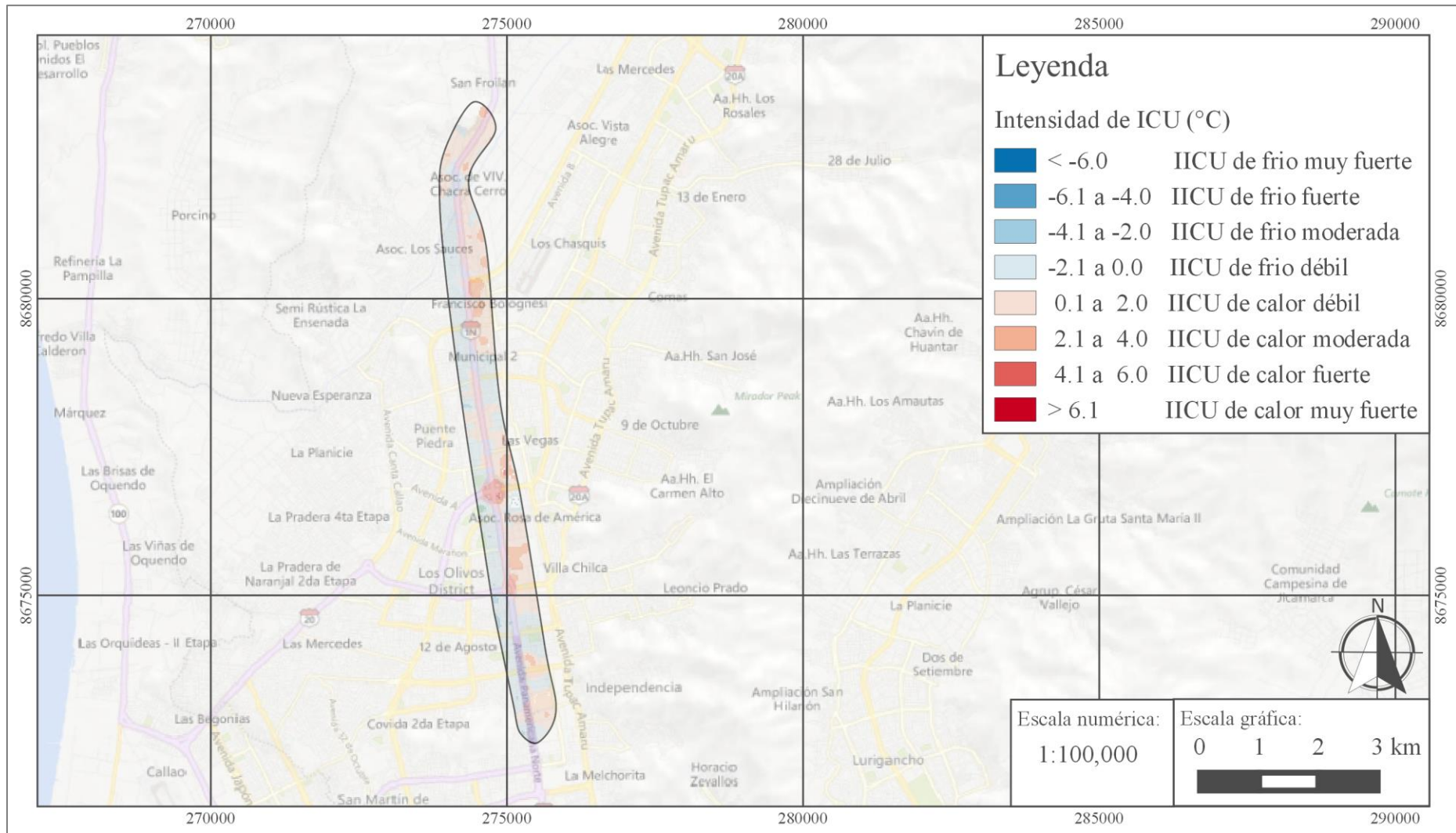


Figura 19: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona B
Elaboración propia, 2016.

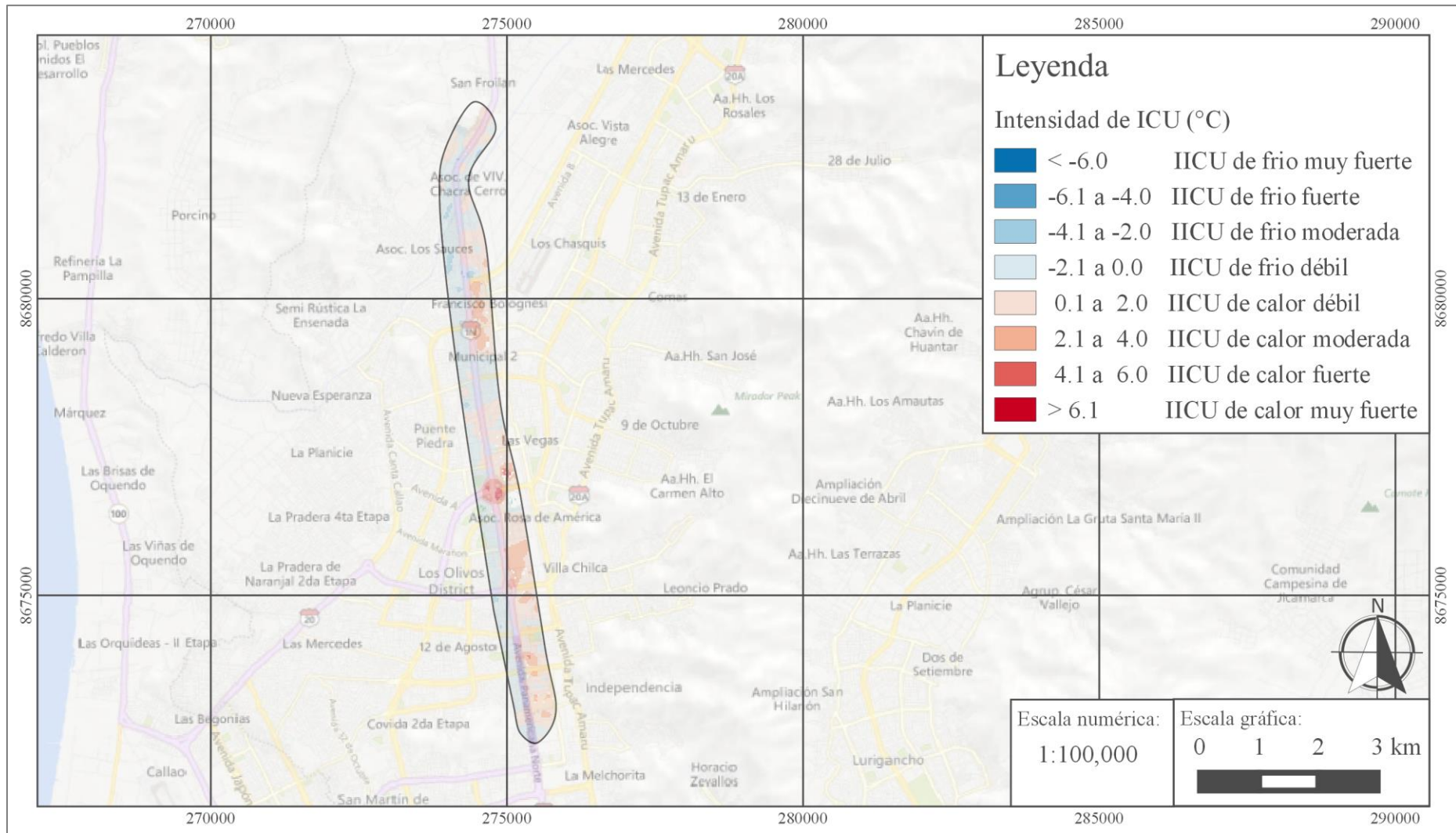


Figura 20: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona B
Elaboración propia, 2016.

Zona C.: Aeropuerto Jorge Chávez.

El 25 de Diciembre de 2013 la isla de calor fue casi de toda la extensión del aeropuerto Jorge Chávez, mostrando valores de intensidad moderada. Posteriormente el 11 de Febrero de 2014, la isla disminuyó su extensión hacia el sur del área evaluada, sin embargo las intensidades aumentaron hasta valores muy fuertes, esta isla de calor fue desplazada por una isla de frío que aparece en la zona norte de esta misma área. Luego el 16 de Abril de 2014 la isla de calor se vuelve a extender por toda la zona del aeropuerto y disminuyó ligeramente su intensidad (hasta intensidad fuerte). El día 29 de Enero de 2015, la extensión de la isla de calor se mantuvo pero disminuyó su intensidad (hasta intensidad moderada). Las islas de calor cambiaron de extensión e intensidad, pero en las cuatro (04) fechas estudiadas se han mantenido presentes.

Se debe tener en consideración que el área de aterrizaje es la zona más amplia de este aeropuerto, la cual es una superficie de asfalto con alta capacidad térmica y por lo tanto absorbe y emite gran cantidad de energía. Esto debe ser un factor a considerar cuando se busca el origen de las islas de calor de esta zona.

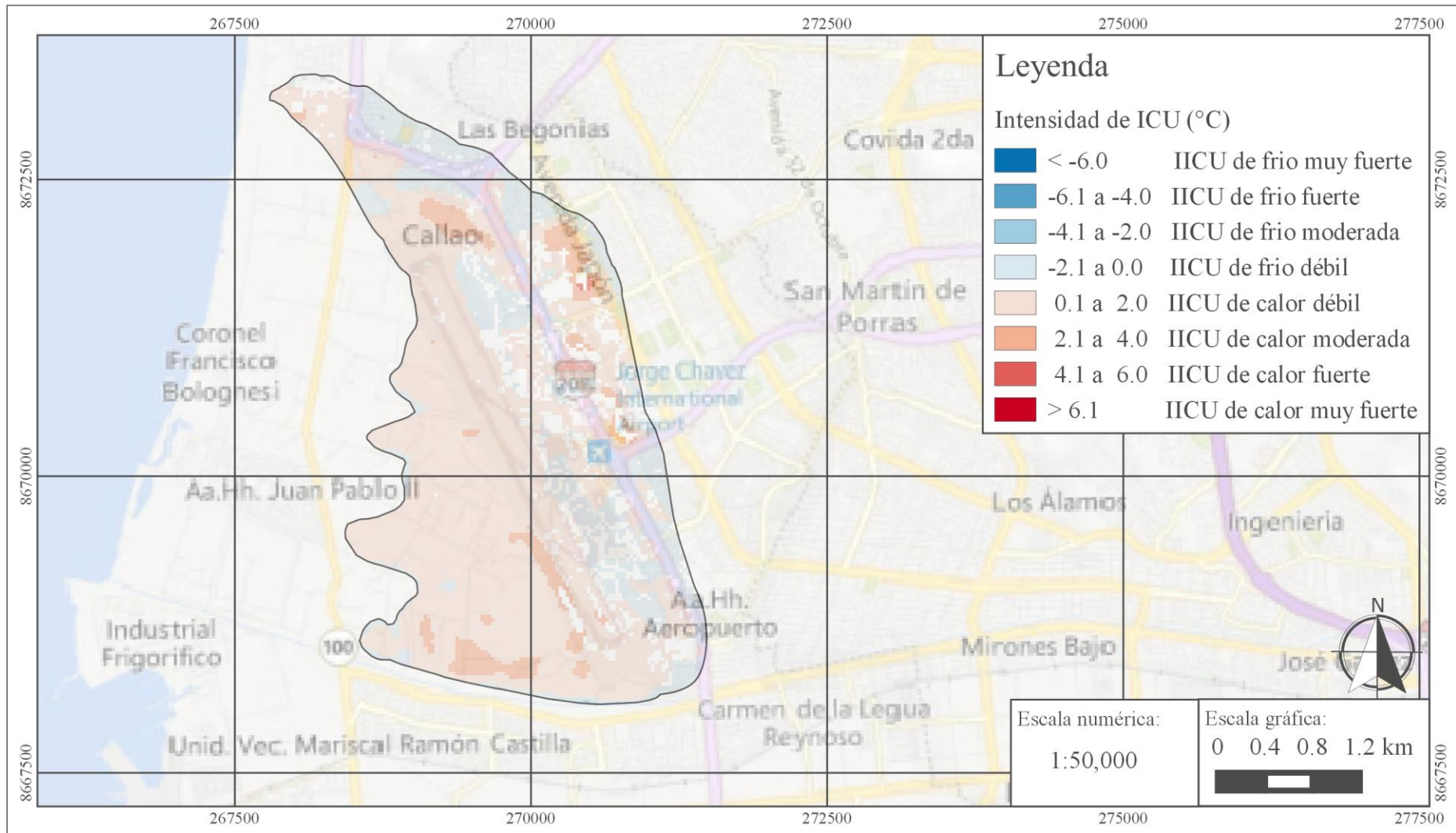


Figura 21: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona C
Elaboración propia, 2016.

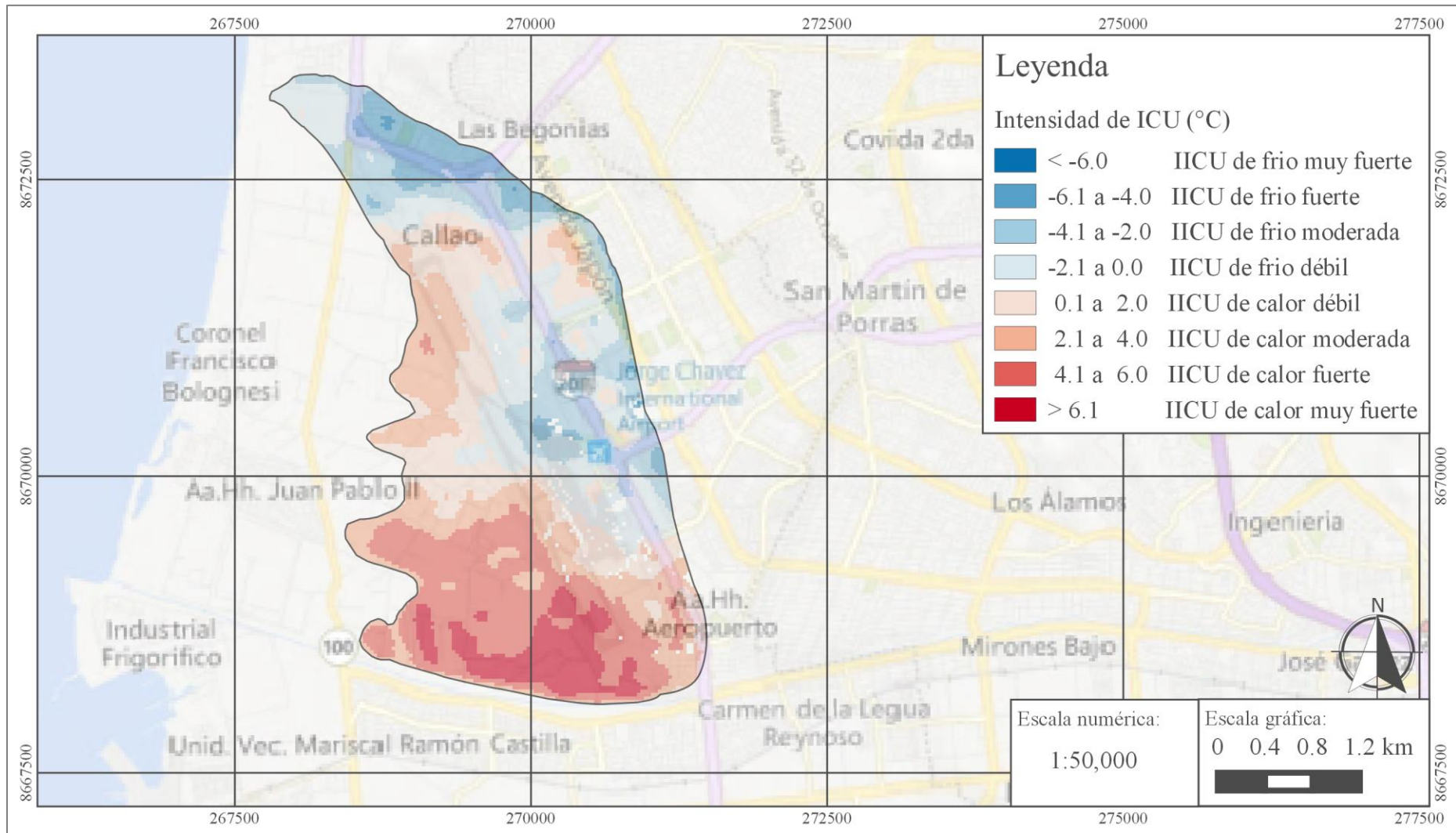


Figura 22: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona C
Elaboración propia, 2016.

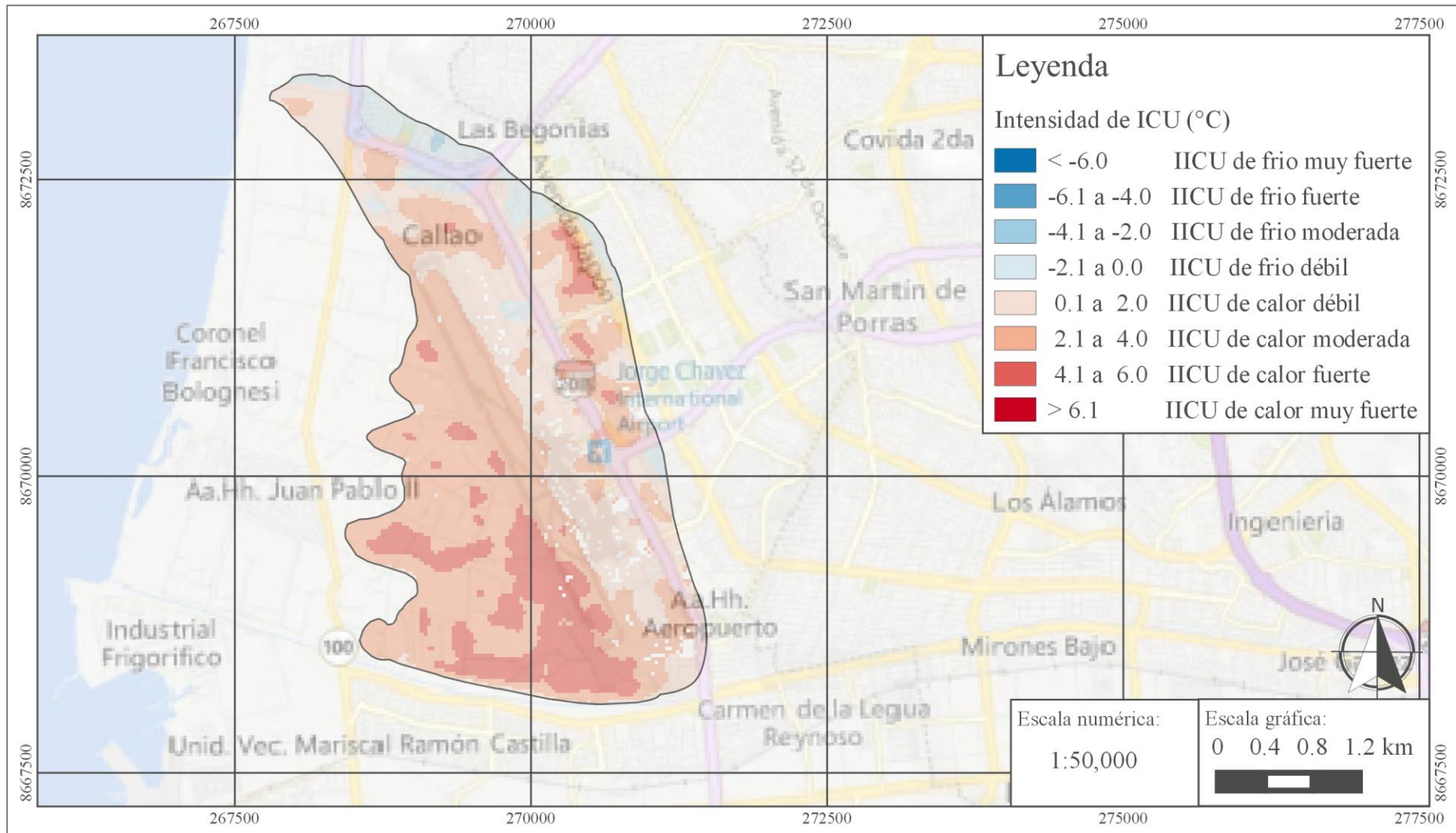


Figura 23: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona C
Elaboración propia, 2016.

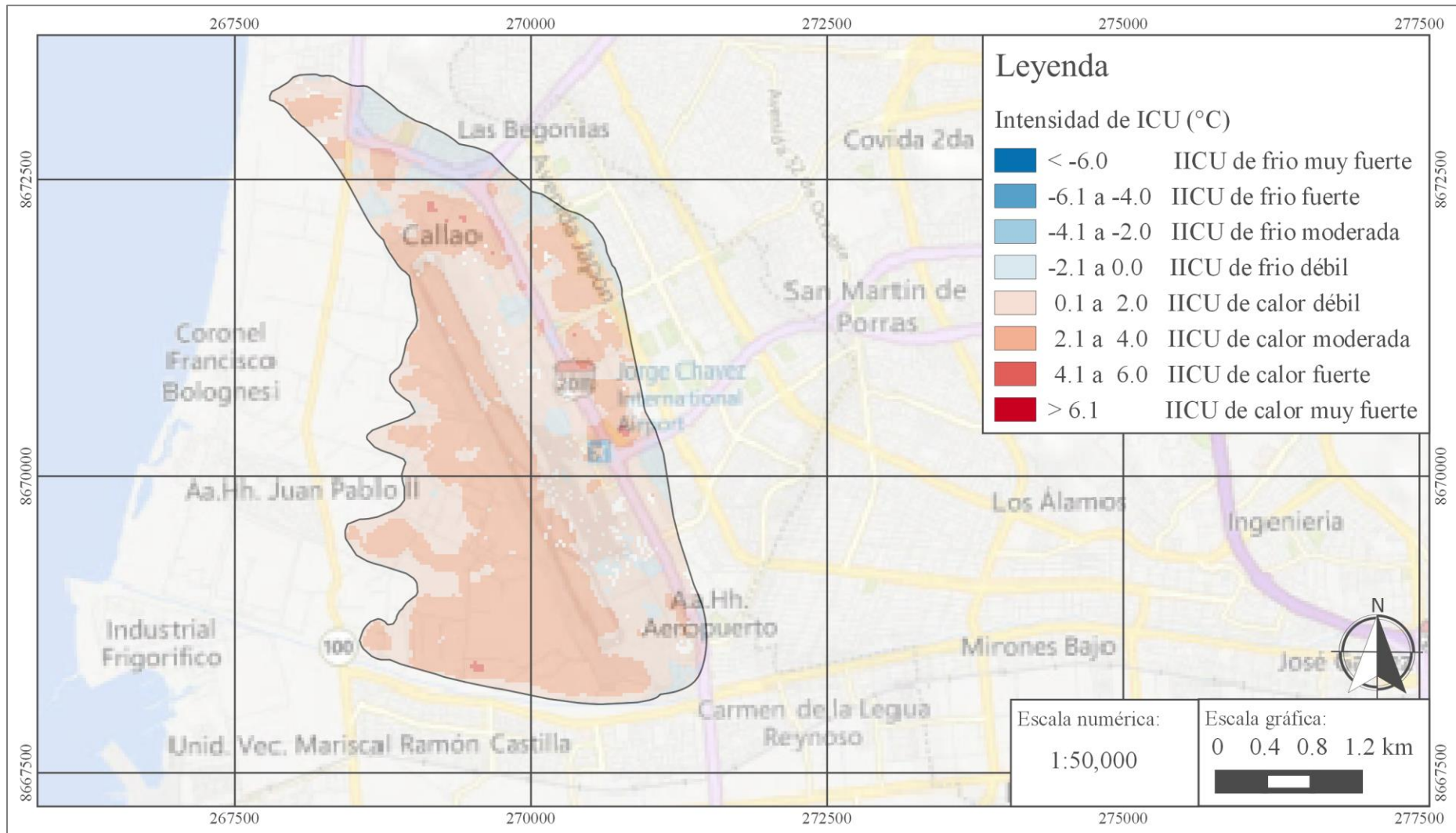


Figura 24: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona C
Elaboración propia, 2016.

Zona D.: Oeste de la Av. Argentina

En la imagen tomada el 25 de Diciembre de 2013 se observaron islas de calor de poca intensidad (hasta intensidad moderada) al este de la zona evaluada. En la siguiente fecha, el 11 de Febrero de 2014 se evidenciaron dos áreas con islas de calor de mayor intensidad (hasta intensidad muy fuerte) a los extremos este y oeste del área estudiada, ubicado alrededor de la Av. Argentina. Luego, en el 16 de Abril de 2014 se observaron islas de calor de menor intensidad (hasta intensidad fuerte) alrededor de la Av. Argentina. En la última fecha evaluada, se observó un comportamiento similar a la fecha anterior. Durante las cuatro (04) fechas analizadas se observaron islas de calor que variaron de intensidad y extensión.

Las islas de calor de esta área puede ser producida por el alto tránsito vehicular de esta zona, la alta densidad de zonas edificadas o la baja densidad de áreas vegetadas, las cuales favorecen la presencia de las islas de calor urbano. Además se debe considerar que esta zona es un área industrial en donde se concentra gran cantidad de fábricas, las cuales generan gases de combustión que podrían estar aumentando la temperatura.

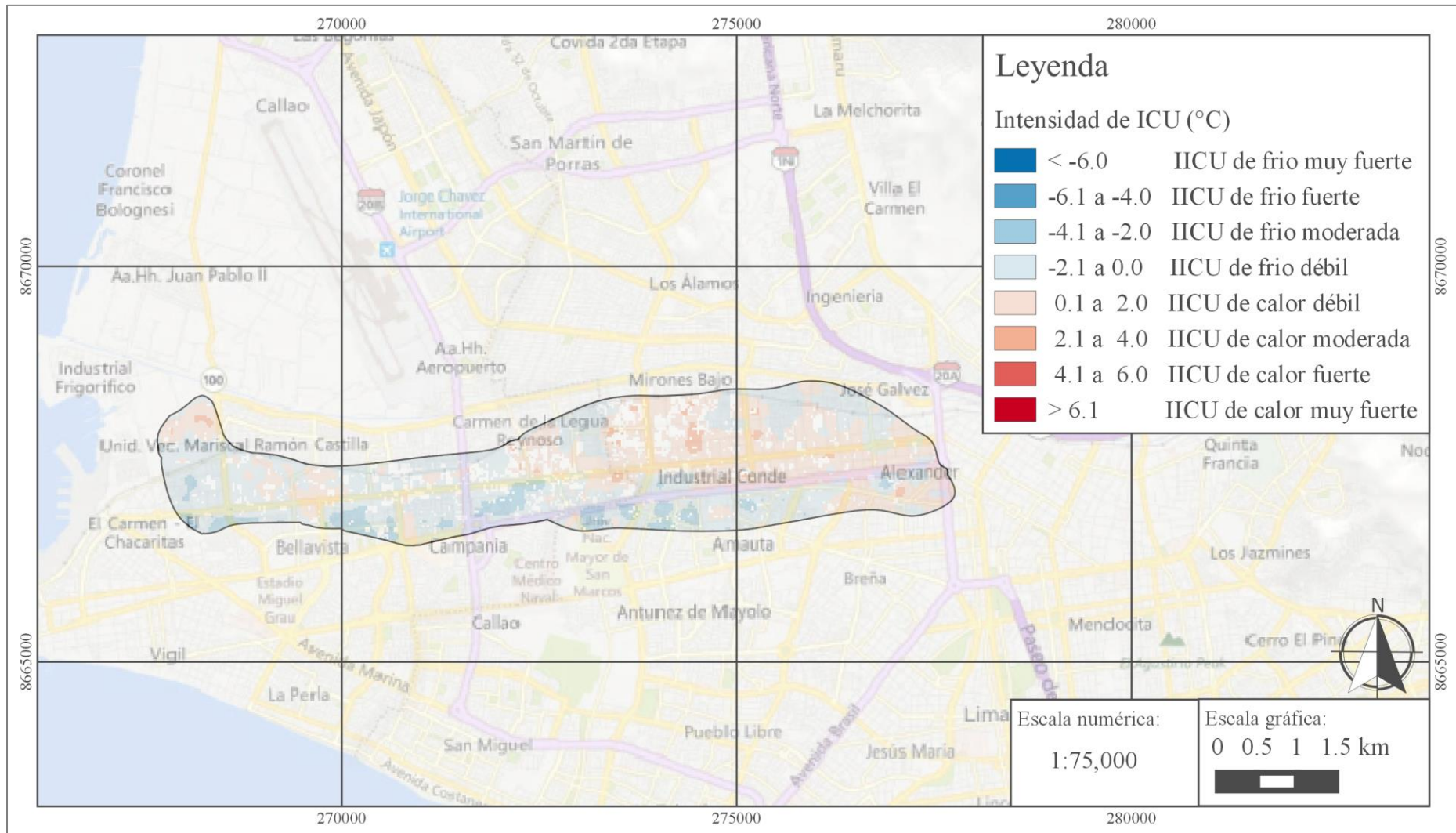


Figura 25: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona D
Elaboración propia, 2016.

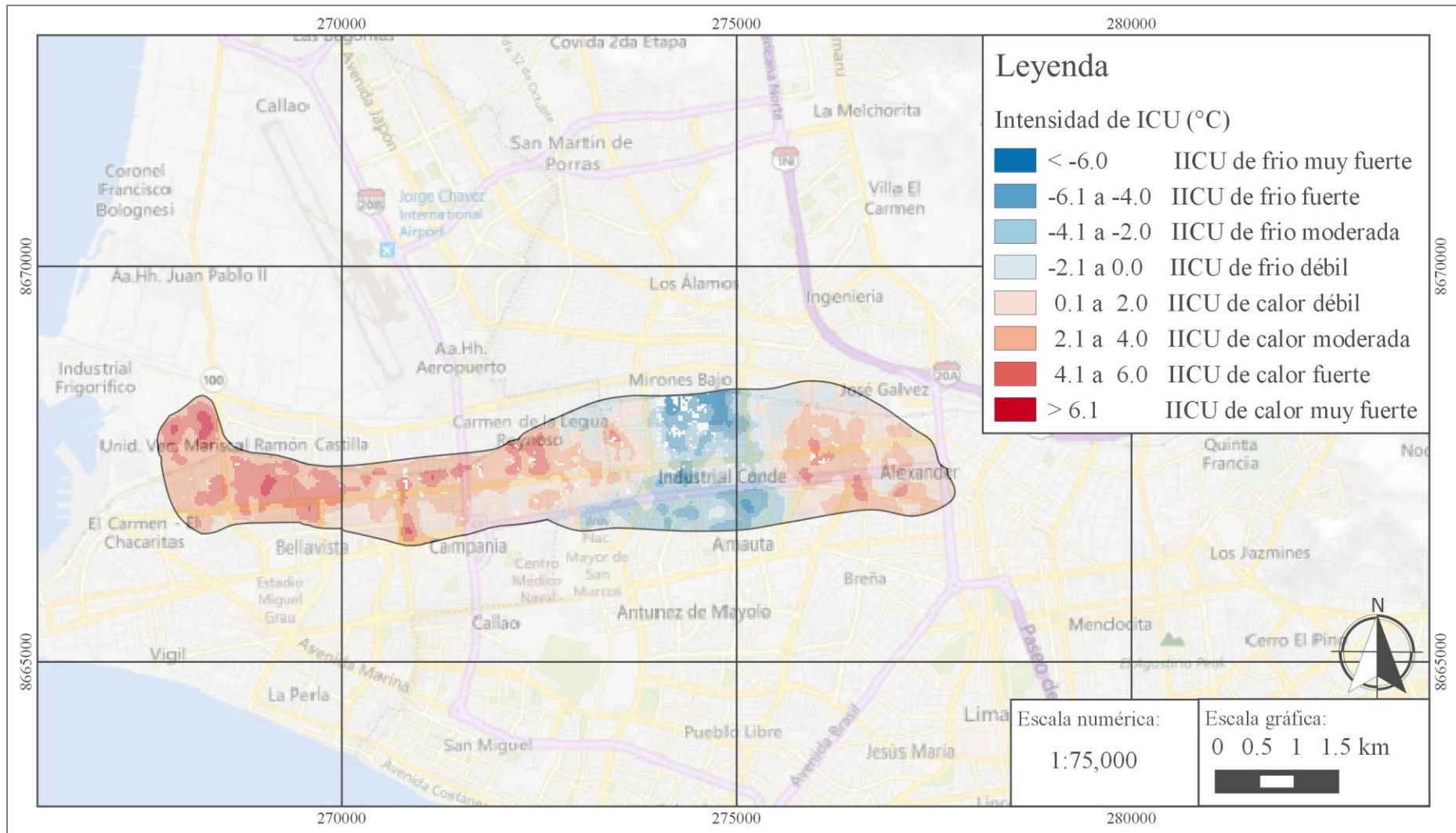


Figura 26: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona D
Elaboración propia, 2016.

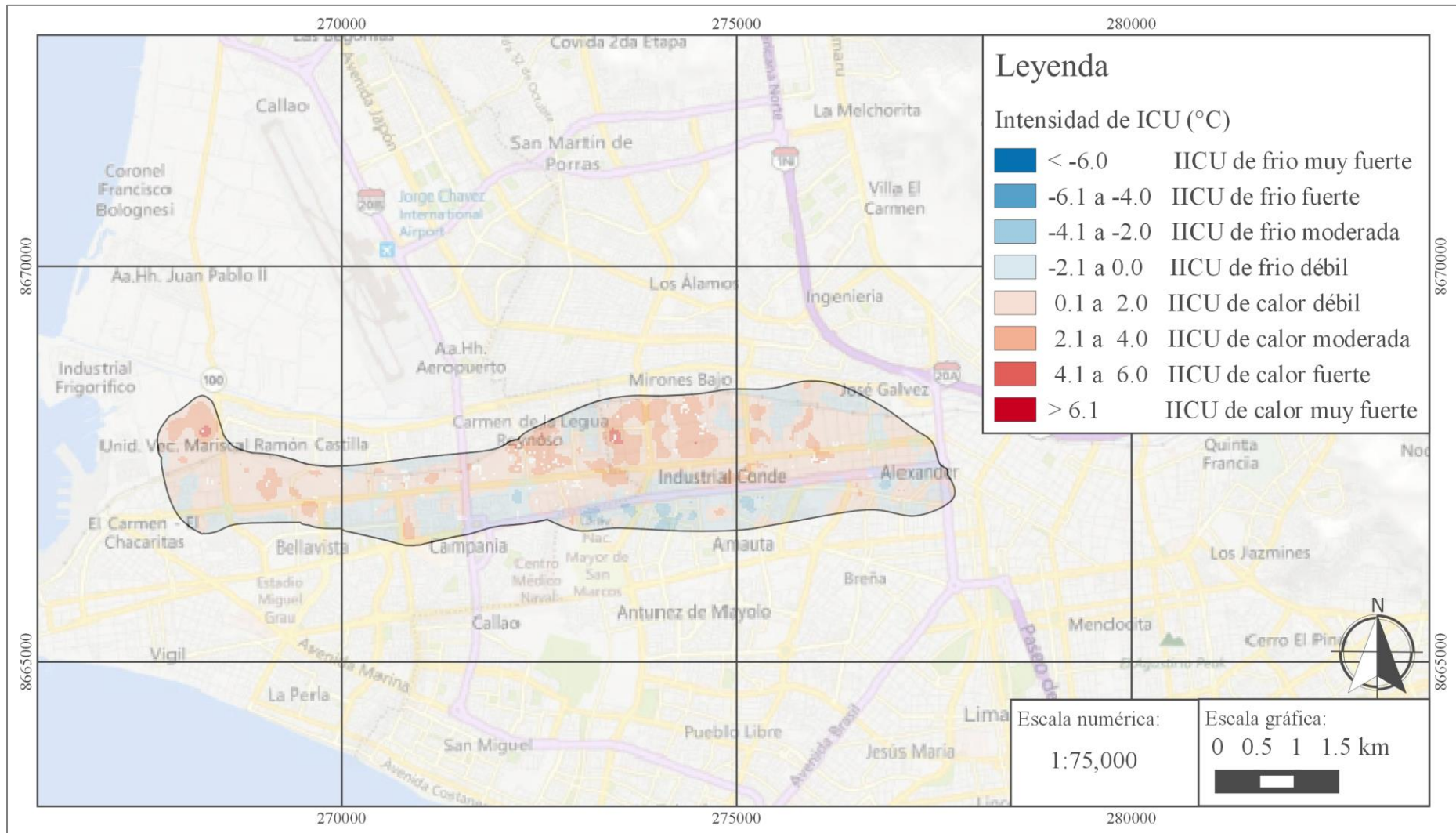


Figura 27: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona D
Elaboración propia, 2016.

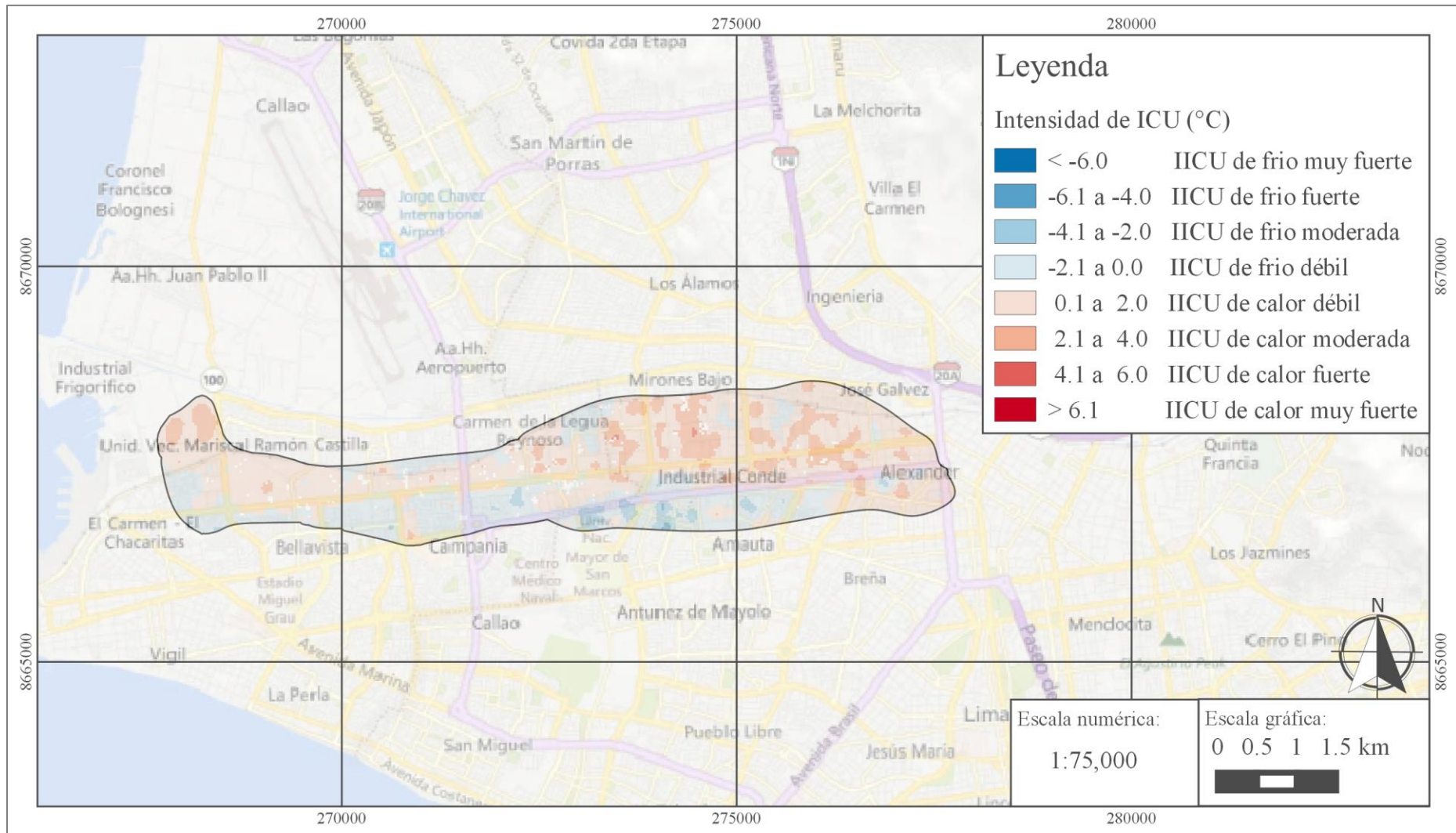


Figura 28: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona D
Elaboración propia, 2016.

Zona E.: Centro histórico de Lima y la zona industrial de Santa Anita

En la imagen del 25 de Diciembre de 2013 se identificaron islas de calor de intensidad moderada, fuerte y muy fuerte, distribuido a lo largo de toda la zona delimitada. Las islas de intensidad moderada y fuerte están ubicadas en la zona sur este, a lo largo de la carretera central. En la siguiente fecha, 11 de Febrero de 2014, la intensidad de las islas de calor aumentó considerablemente (intensidades fuertes y muy fuertes) a lo largo del centro histórico de Lima y alrededor de la carretera central. Además apareció una isla de frío en la zona nor oeste de la zona evaluada. En el 16 de Abril de 2014 y el 29 de Enero de 2015 las islas de calor disminuyeron considerablemente su intensidad (hasta intensidad moderada, principalmente), manteniendo una isla de calor de intensidad muy fuerte al sur oeste del cruce de la panamericana norte con la carretera central, en donde está un cerro. Las pequeñas islas de calor han estado presentes en los cuatro (04) días estudiados pero con intensidades y extensiones diferentes.

De manera similar a la Zona D, en esta área se pueden haber generado islas de calor debido al alto tránsito vehicular, alta densidad de edificaciones, baja densidad de vegetación o alta concentración de fábricas en la zona.

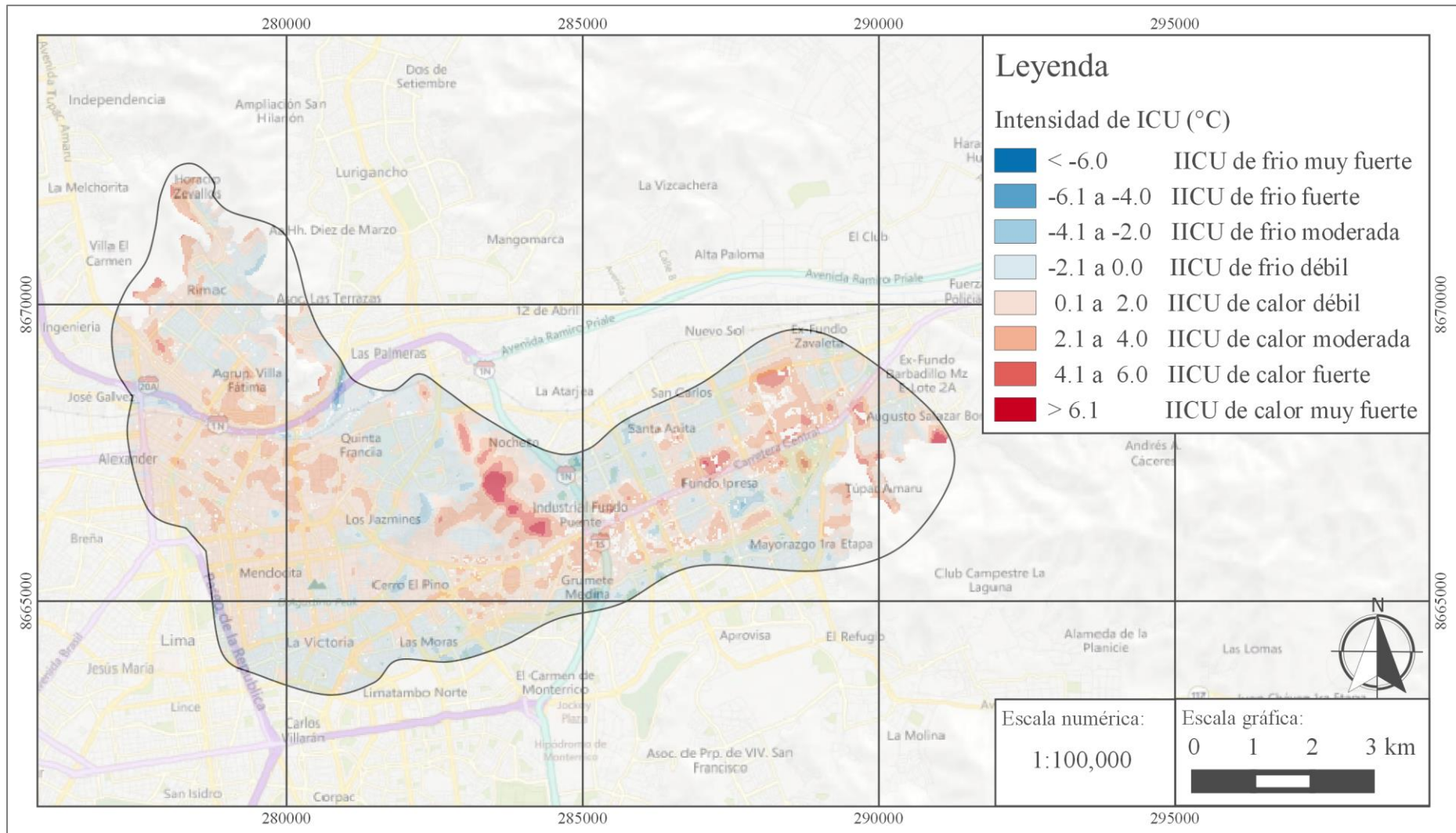


Figura 29: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona E
Elaboración propia, 2016.

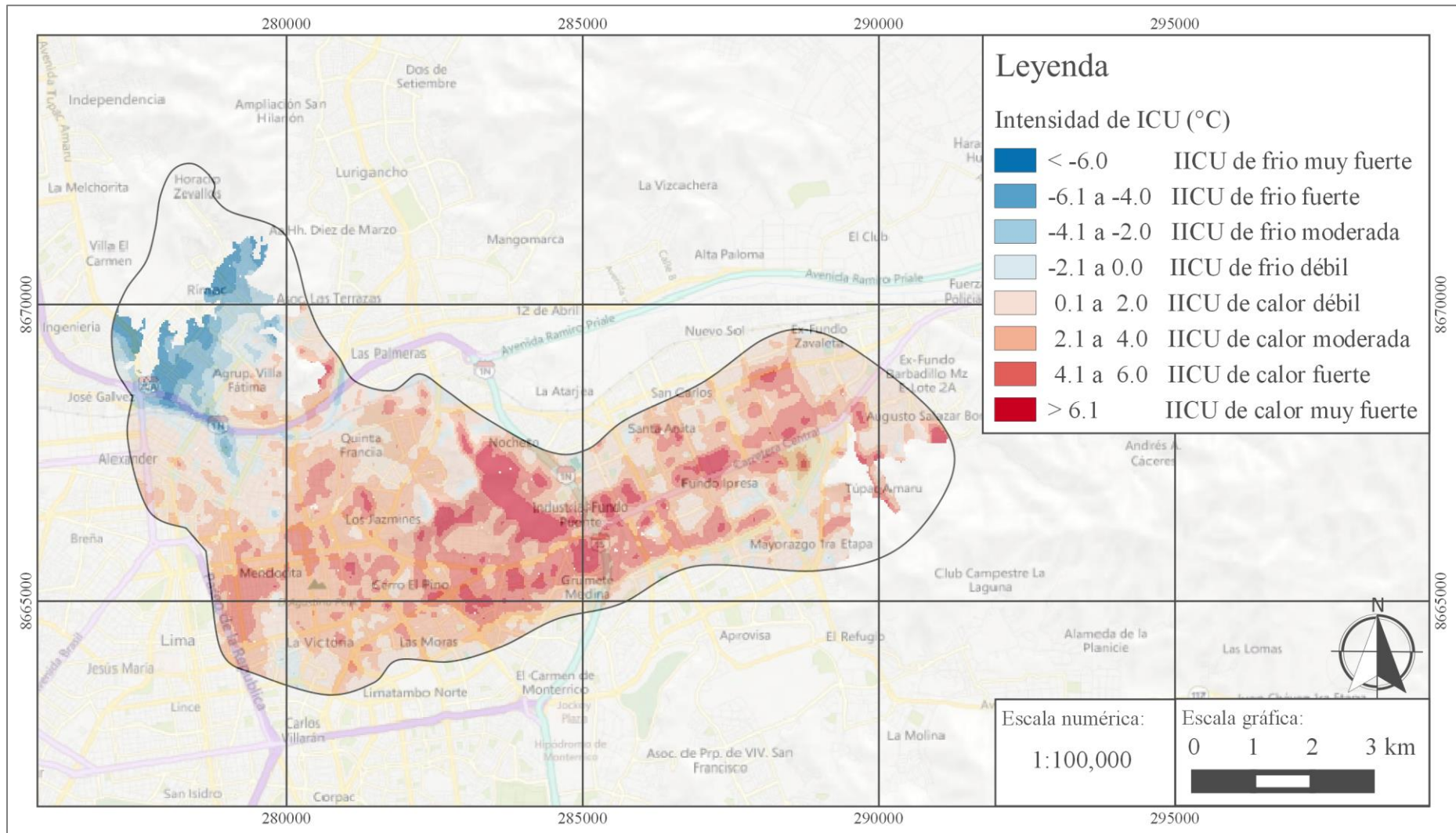


Figura 30: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona E
Elaboración propia, 2016.

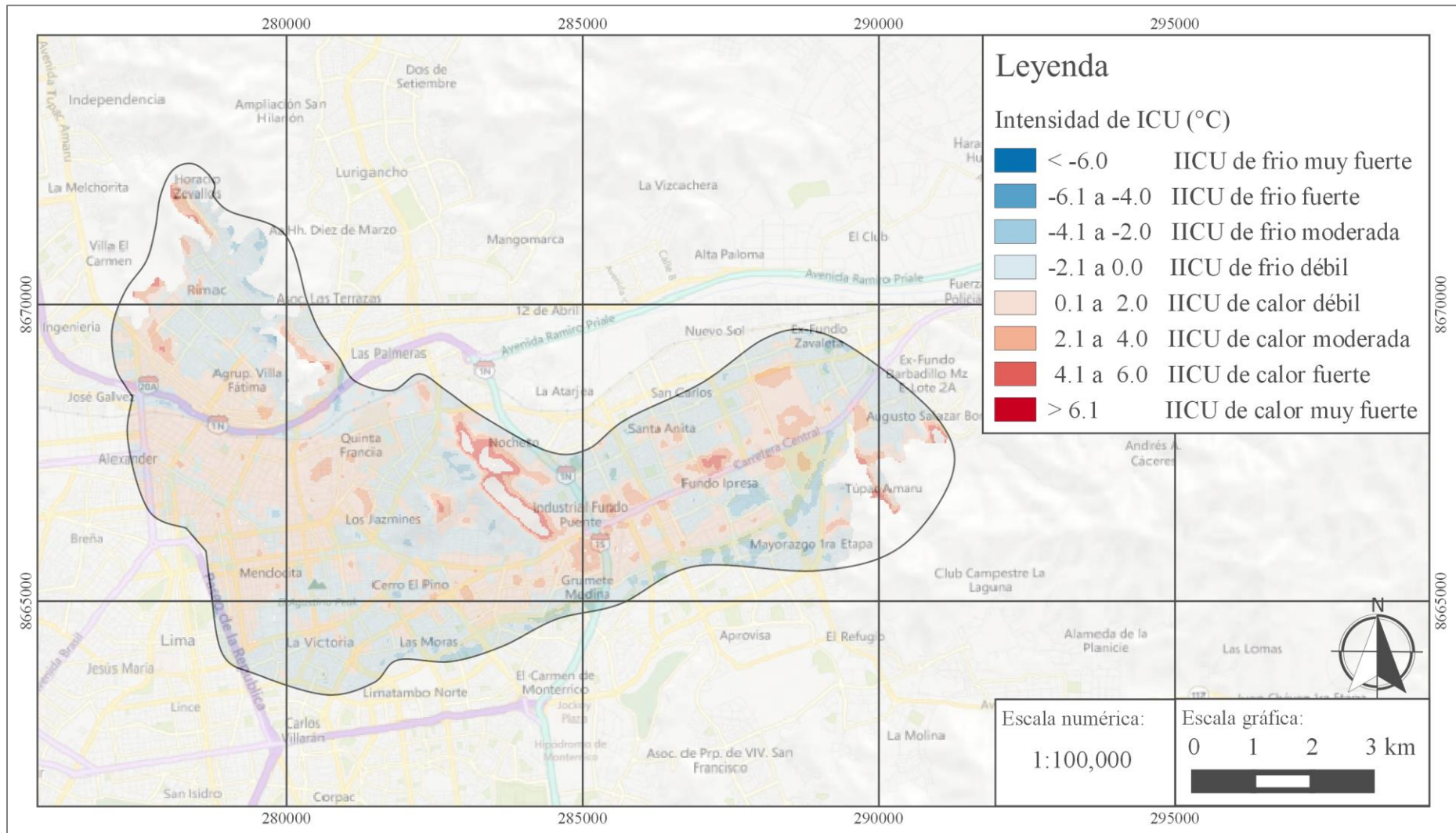


Figura 31: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona E
Elaboración propia, 2016.

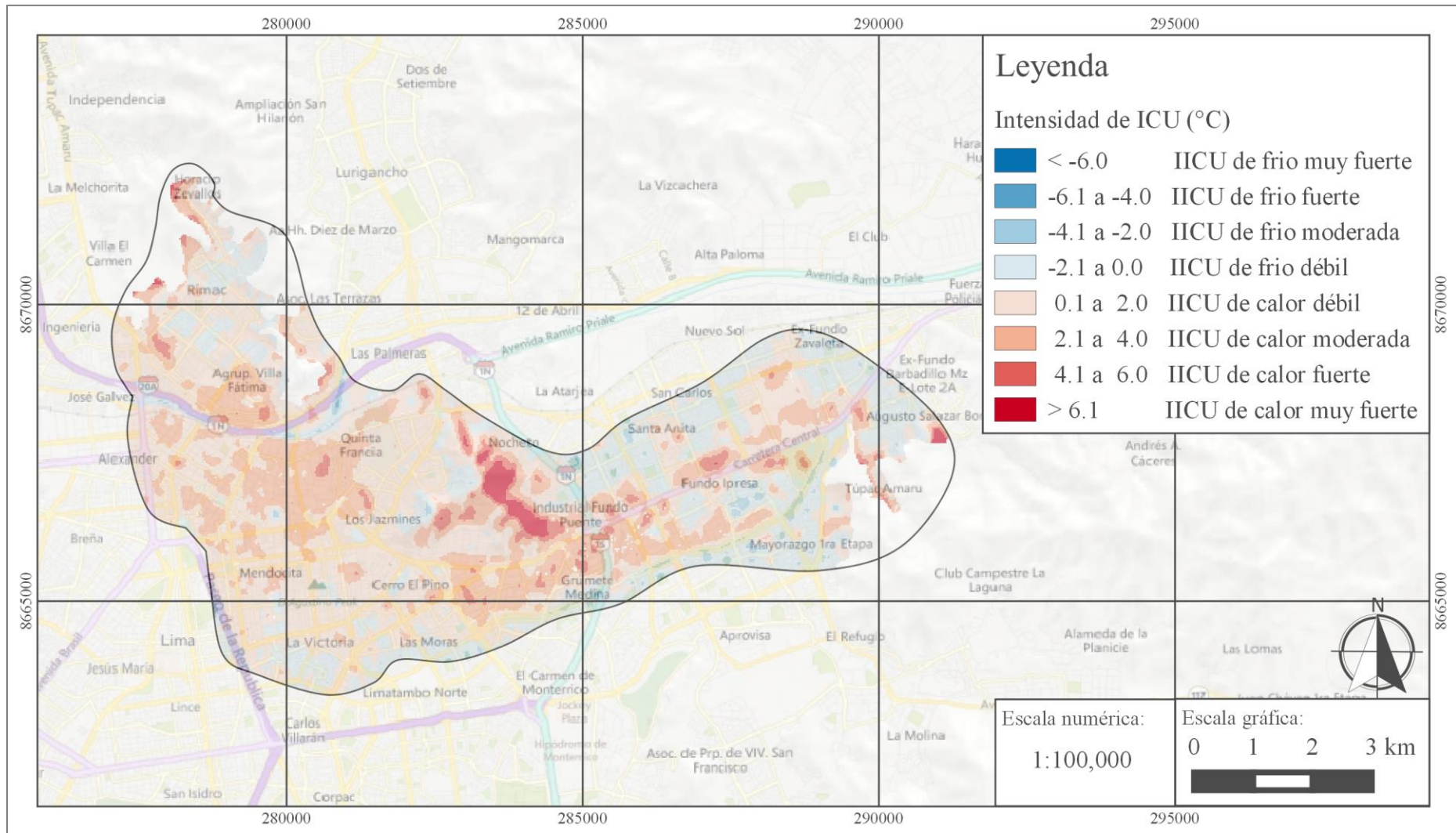


Figura 32: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona E
Elaboración propia, 2016.

Zona F. Alrededor de la zona este del Río Rímac.

En la imagen del 25 de Diciembre de 2013 se observaron varias islas de frío muy fuertes a lo largo del río Rímac. En la imagen de 16 de Abril de 2014, estas islas se mantuvieron, pero también aparecieron islas de calor en la zona sur oeste de la zona delimitada. Posteriormente, en la fecha 14 de Abril de 2014 la extensión de las islas de frío fue similares. Luego, el 29 de Enero del 2015, siguió la presencia de las islas de frío en la zona Este del río. A lo largo de las cuatro (04) fechas fue constante la presencia de islas de frío alrededor del río Rímac, pero las extensiones e intensidades variaron en los distintos días.

Al buscar las causas de las islas de frío en esta zona se debería tener en cuenta no solo la presencia del cuerpo de agua como factor enfriador (debido al bajo albedo y baja capacidad térmica), sino también el hecho de que alrededor del río se encuentran zonas de cultivo que también tienen el efecto de disminuir la temperatura de la superficie del suelo.

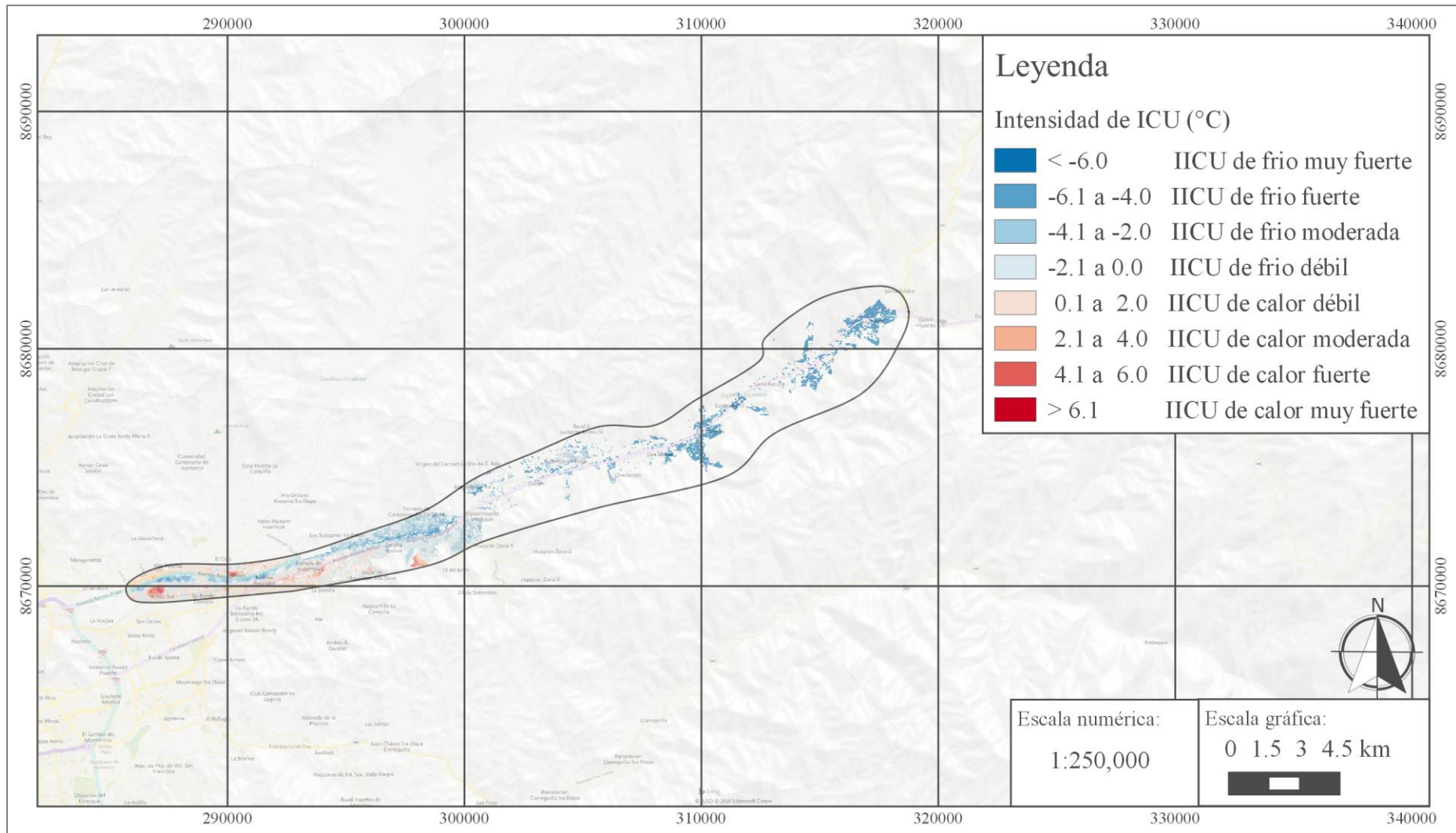


Figura 33: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona F
Elaboración propia, 2016.

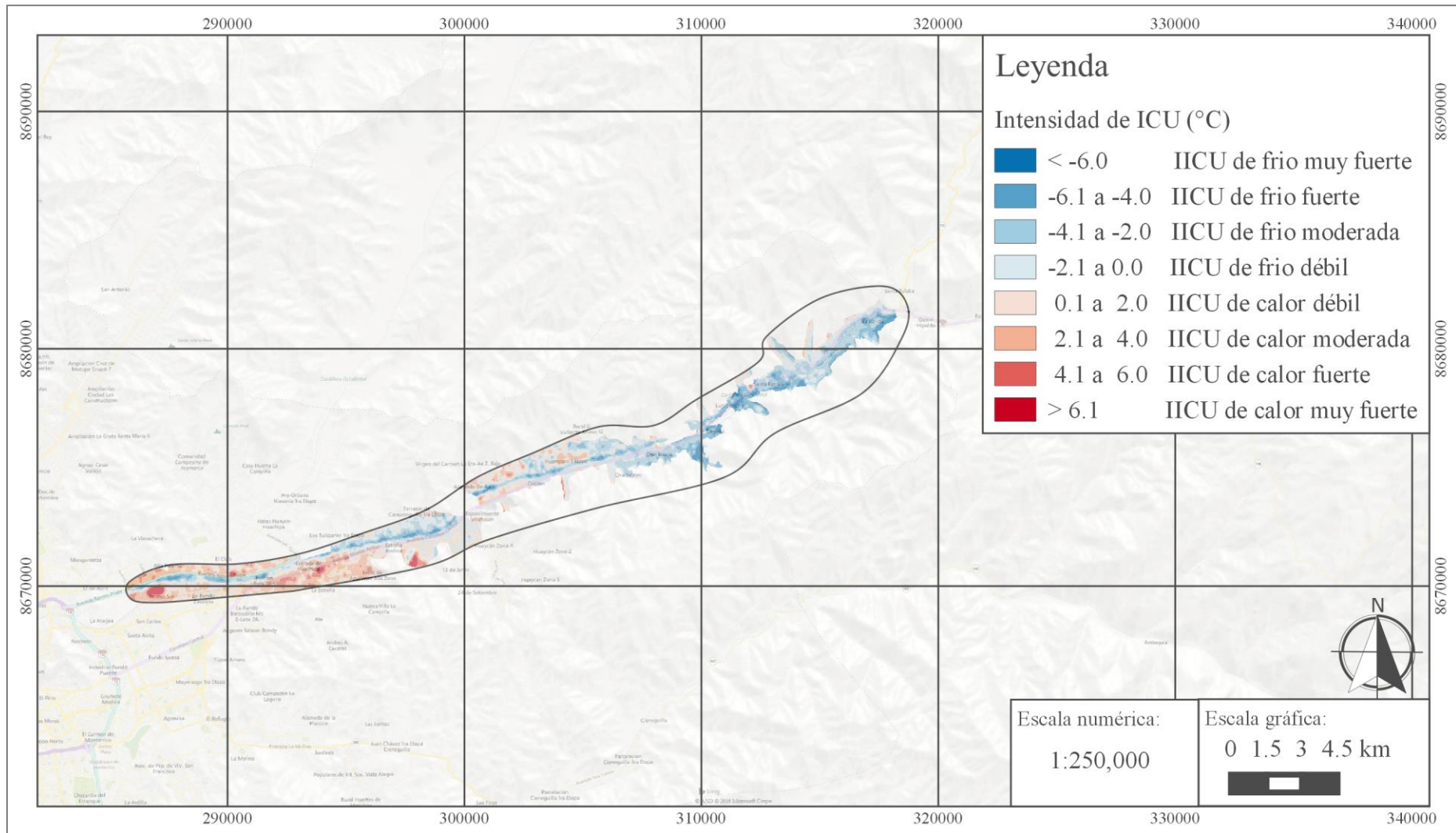


Figura 34: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona F
Elaboración propia, 2016.

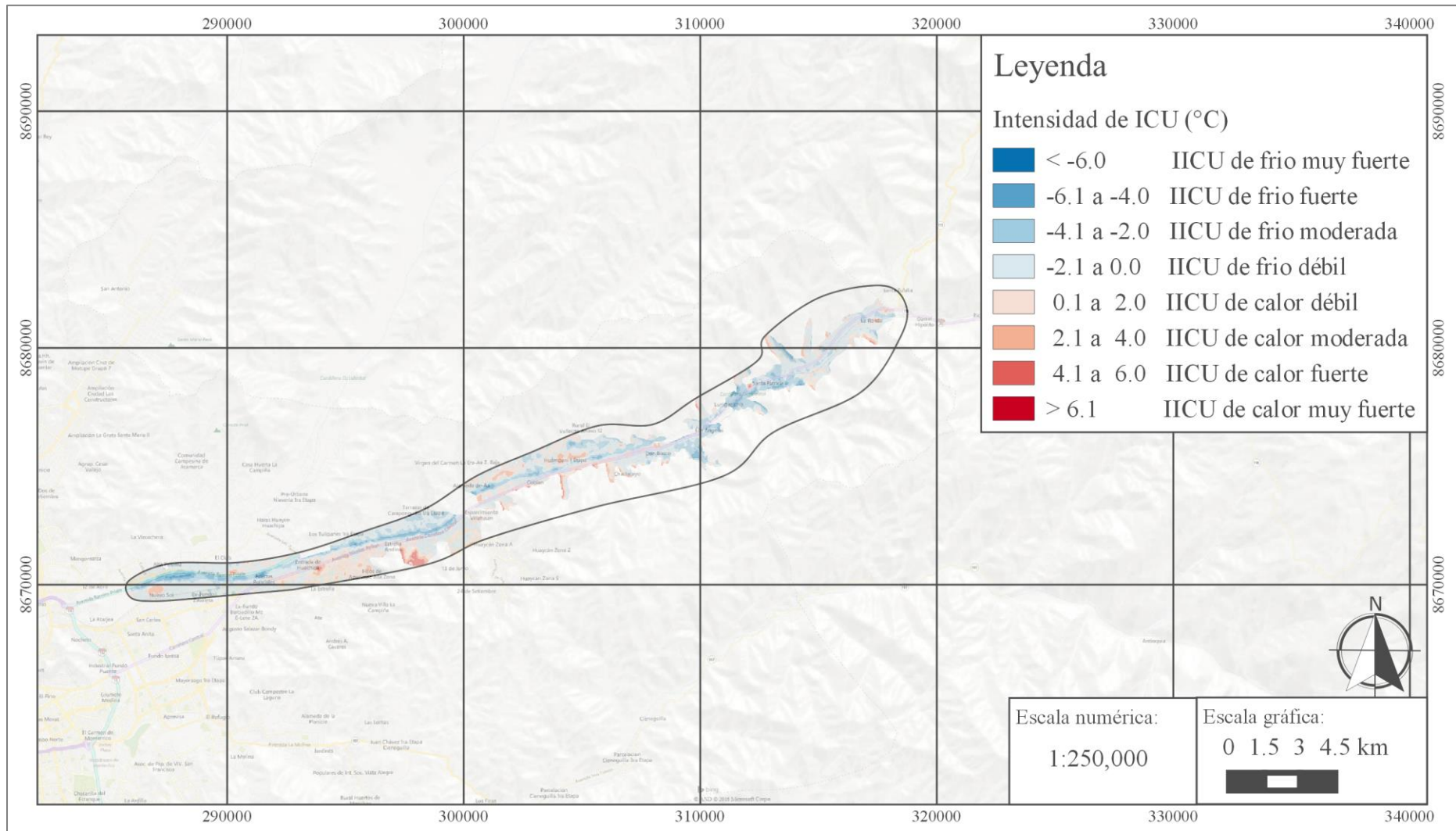


Figura 35: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona F
Elaboración propia, 2016.

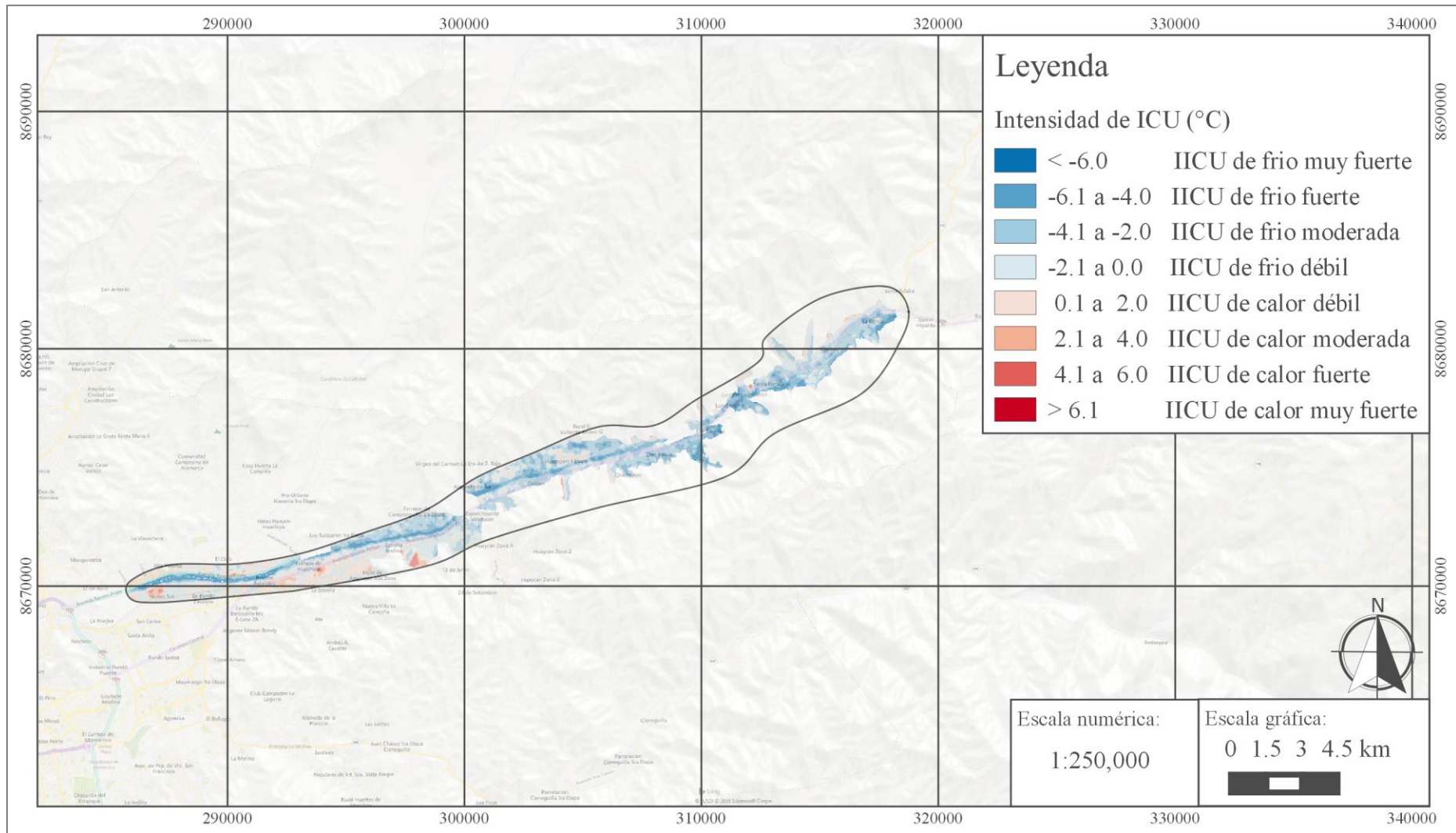


Figura 36: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona F
 Elaboración propia, 2016.

Zona G. Zona oeste de la ciudad en los distritos de San Isidro, San Miguel, Magdalena, Barranco, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco y San Borja.

En la imagen del 25 de Diciembre de 2013 se observaron varias islas de frío de intensidad moderada, fuerte y muy fuerte distribuidas a lo largo de los distritos de San Isidro, San Miguel, Magdalena, Barranco, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco y San Borja. La isla de frío de mayor intensidad se ubicó sobre el Club El Golf. Posteriormente el 11 de Febrero de 2014, la extensión del conjunto de islas de frío disminuyó y su intensidad aumentó (hasta intensidad muy fuerte), además aparecieron islas de frío a los extremos -Nor oeste y Sur este de dichas islas de frío, ubicadas al sur del Parque de las Leyendas (en la zona de la huaca) y al inicio de la Av. Angamos, en Surquillo. Luego, el 16 de Abril de 2014 las islas de frío de intensidad fuerte y muy fuerte abarcaron casi toda el área evaluada, exceptuando la zona de la Huaca del Parque de las Leyendas. Finalmente, el 29 de Enero de 2015 la intensidad de las islas de frío disminuyeron (principalmente intensidades moderada y fuerte), pero la extensión se mantuvo. La isla de frío con mayor intensidad en esta fecha se encontró en el Club El Golf. Durante las cuatro (04) fechas estudiadas, las islas de frío se extienden entre San Isidro, San Miguel, Magdalena, Barranco, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco y San Borja variando su intensidad pero aparentemente manteniendo su extensión.

Se debe tener en cuenta que esta zona está cerca al mar, por lo que puede ser enfriado por la brisa marina y tiene alta densidad de áreas vegetadas (parques y jardines), los cuales también tienen un efecto enfriador.

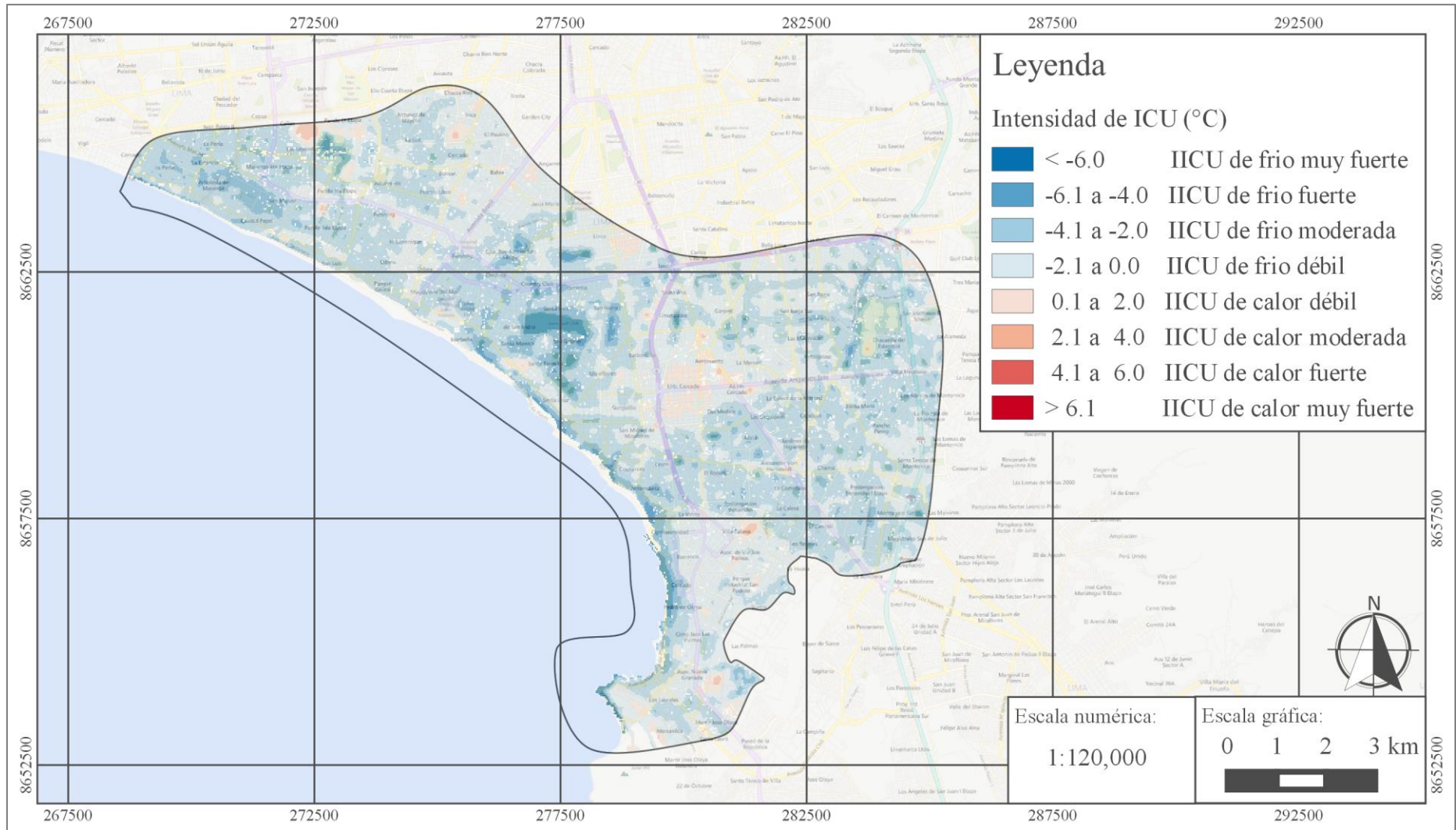


Figura 37: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona G
Elaboración propia, 2016.

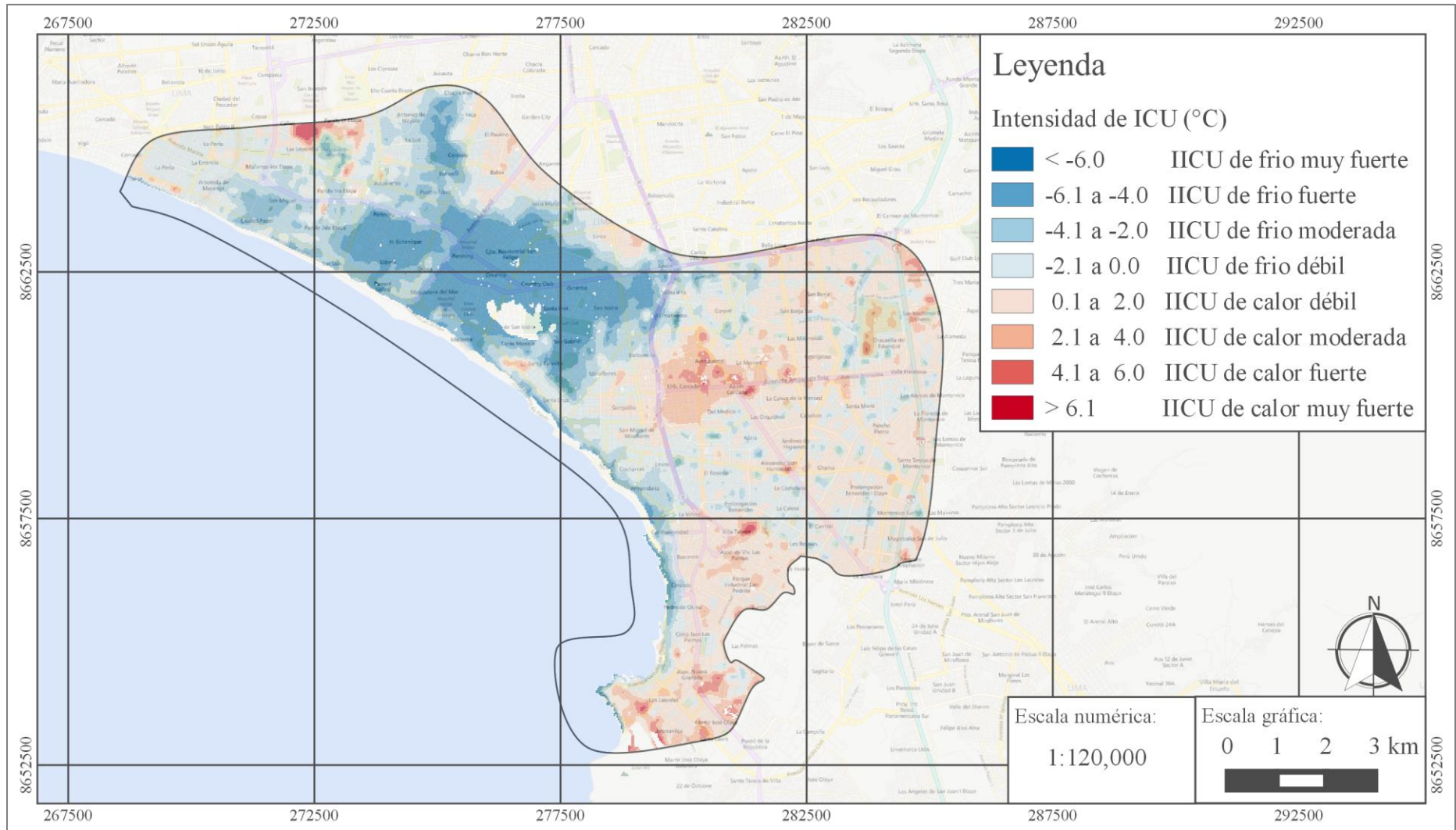


Figura 38: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona G
Elaboración propia, 2016.

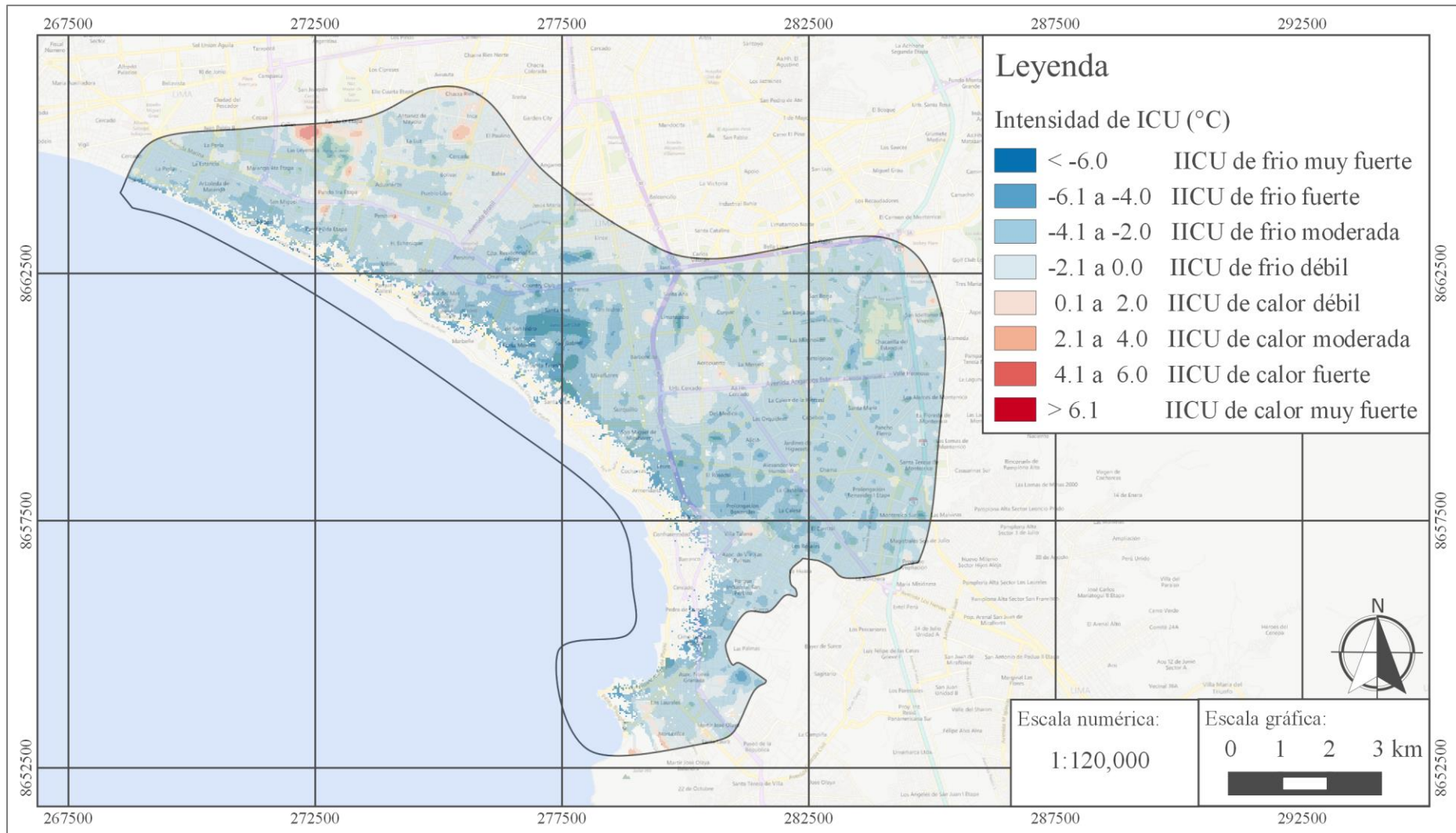


Figura 39: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona G
Elaboración propia, 2016.

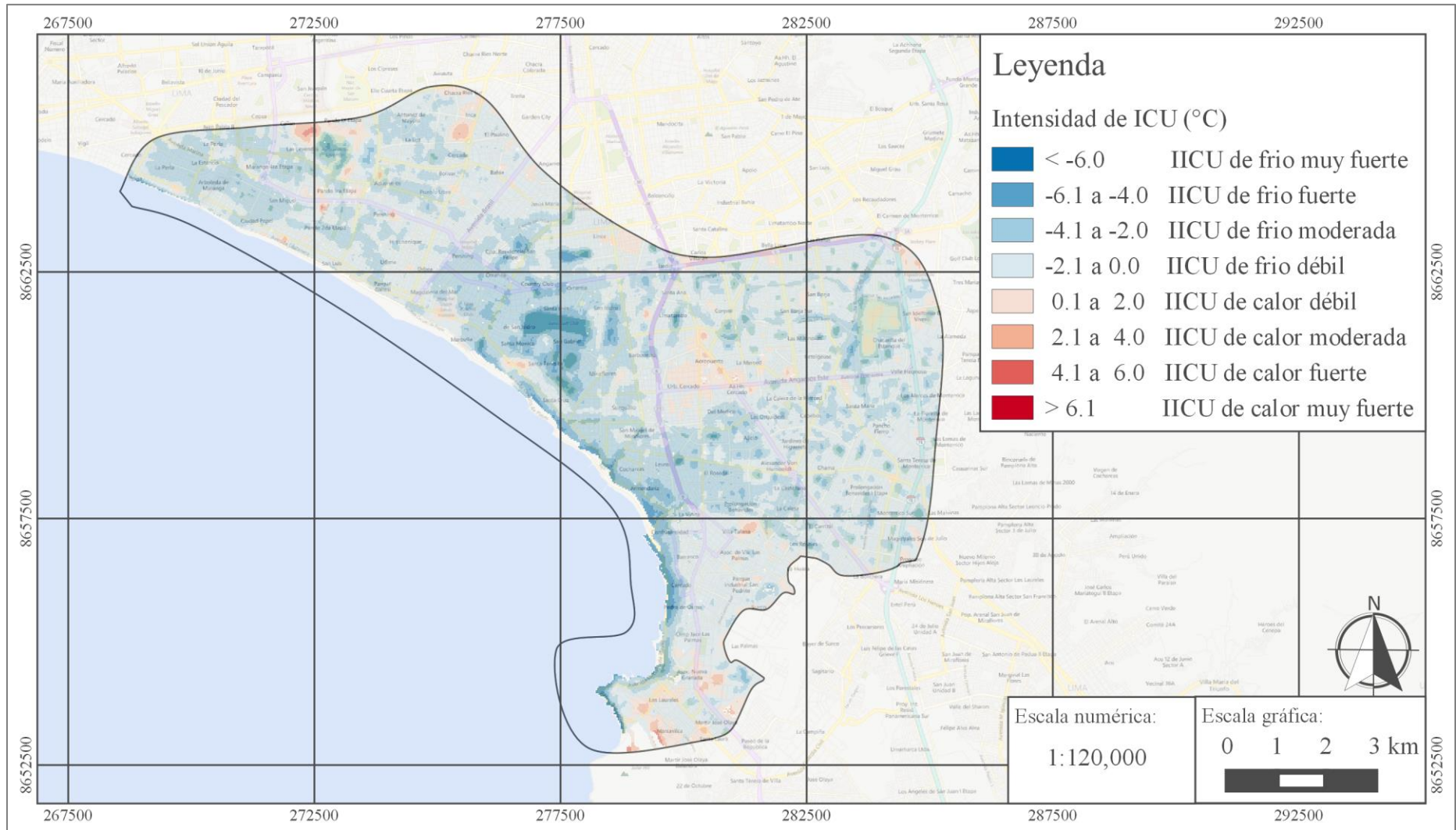


Figura 40: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona G
Elaboración propia, 2016.

Zona H. Zona sur de Lima Metropolitana, alrededor de la zona industrial de Lurín.

En la imagen recogida el 25 de Diciembre de 2013 se pueden observar algunas islas de calor de intensidad moderada, fuerte y muy fuerte ubicadas principalmente en la zona este del área delimitada, alrededor de una cantera, además se observaron dos pequeñas islas de frío, una al lado oeste de la panamericana sur y otro en el sector 7 - grupo 4 en Lurín. Para el 11 de Febrero de 2014, las islas de calor aumentaron de extensión y en intensidad (siendo principalmente fuertes y muy fuertes), abarcando casi toda el área evaluada, sin embargo se mantuvieron unas pequeñas islas de frío en las mismas áreas que la fecha anterior. El 16 de Abril de 2014 las islas de calor disminuyeron considerablemente de área, siendo esta similar a la primera fecha mencionada, además se mantuvieron las pequeñas islas de frío de los días anteriores. Luego, el 29 de enero de 2015, la extensión de las islas de calor aumenta ligeramente y se mantiene la presencia de las islas de frío. Para las cuatro (04) fechas evaluadas se observó la presencia de islas de calor en la zona industrial de Lurín, al norte de Lima Metropolitana, las cuales siempre fueron acompañadas de islas de frío.

Es posible que la presencia de la isla de calor en esta área sea producto de la alta densidad de fábricas, la presencia predominante del suelo desnudo y la baja densidad de áreas vegetadas en esta zona. Las fábricas suelen producir gases de combustión, además el suelo desnudo tiene alto albedo y alta capacidad térmica, ambas características favorecen el desarrollo de la ICU.

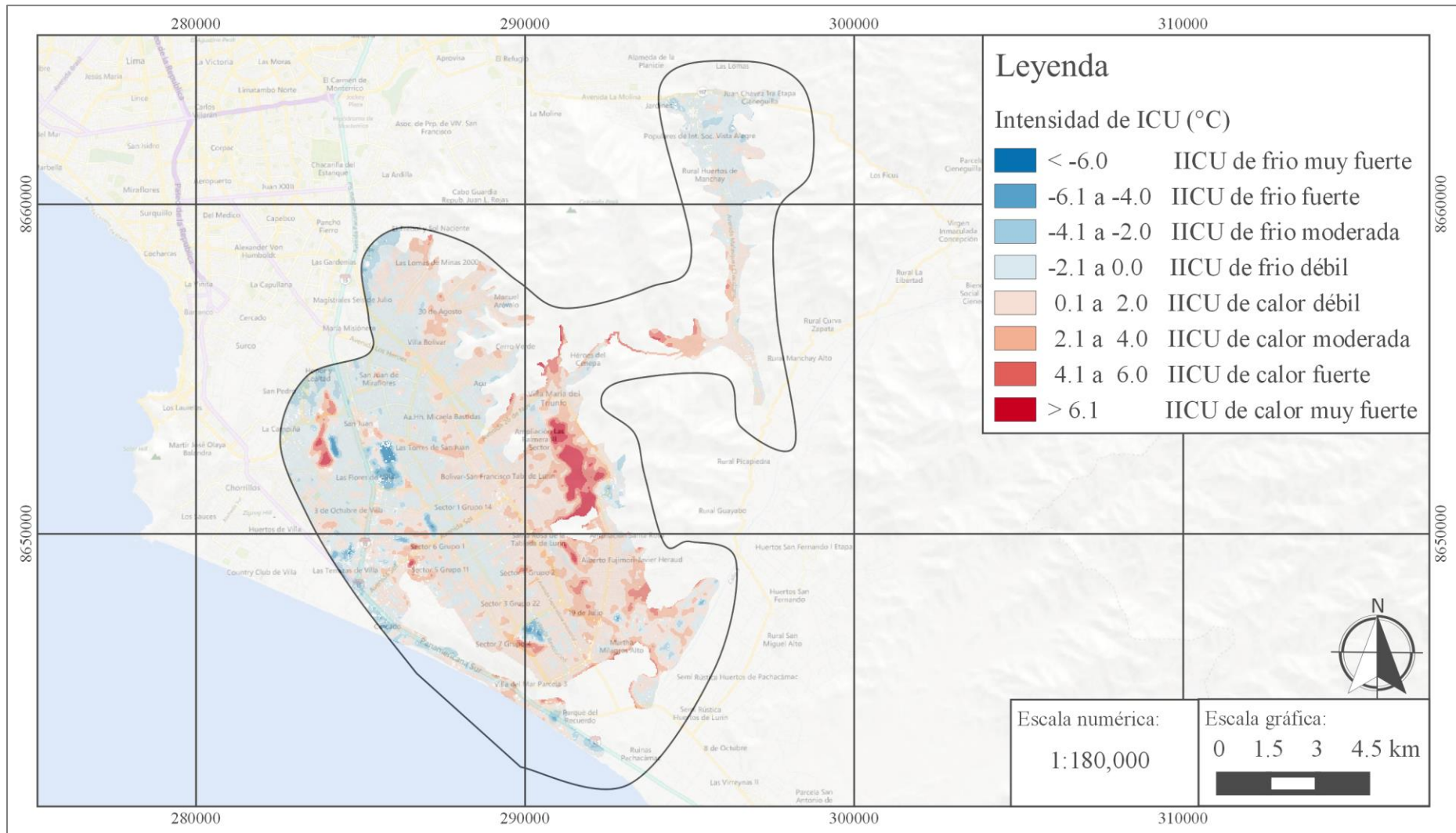


Figura 41: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona H
Elaboración propia, 2016.

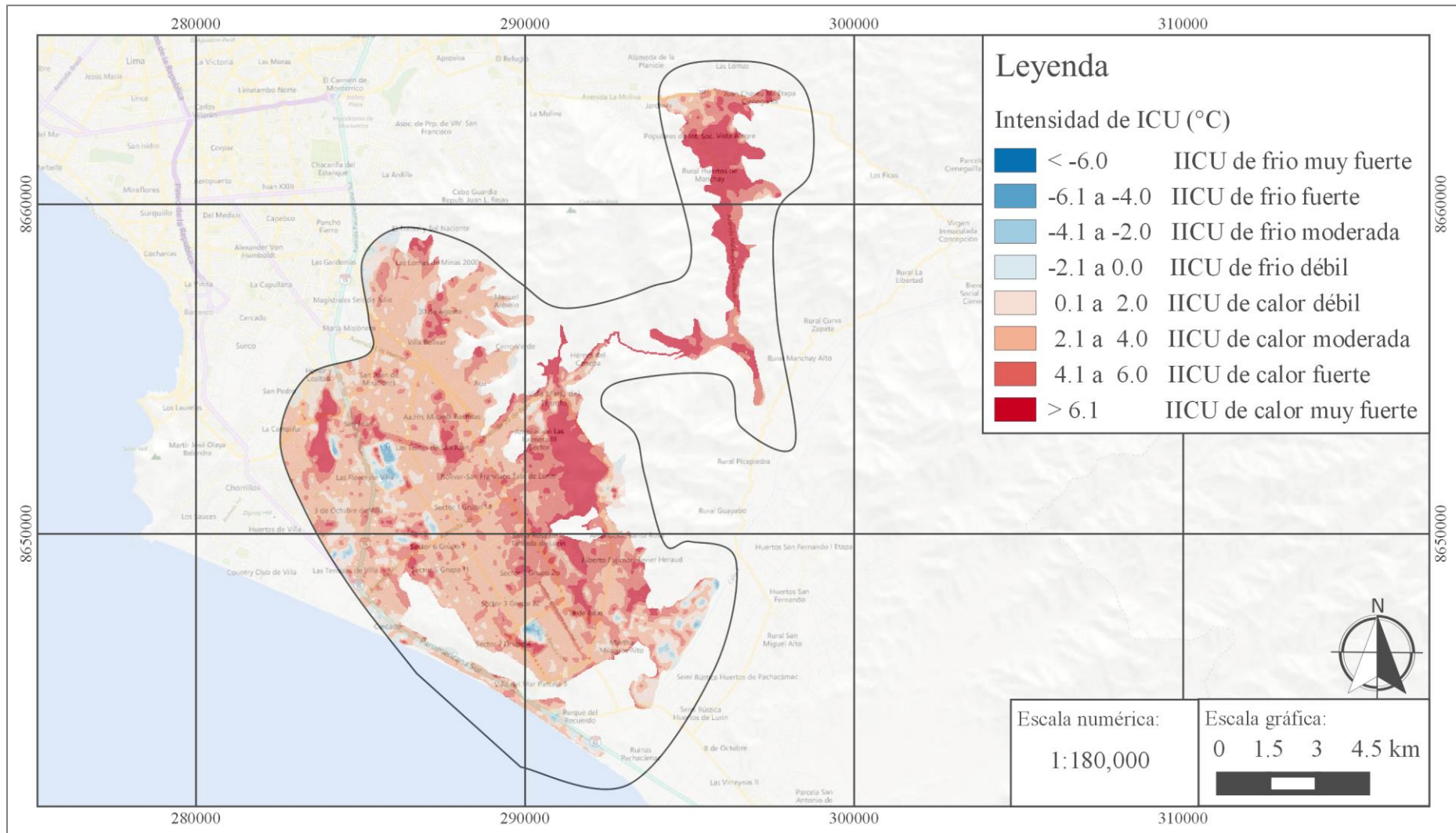


Figura 42: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona H
Elaboración propia, 2016.

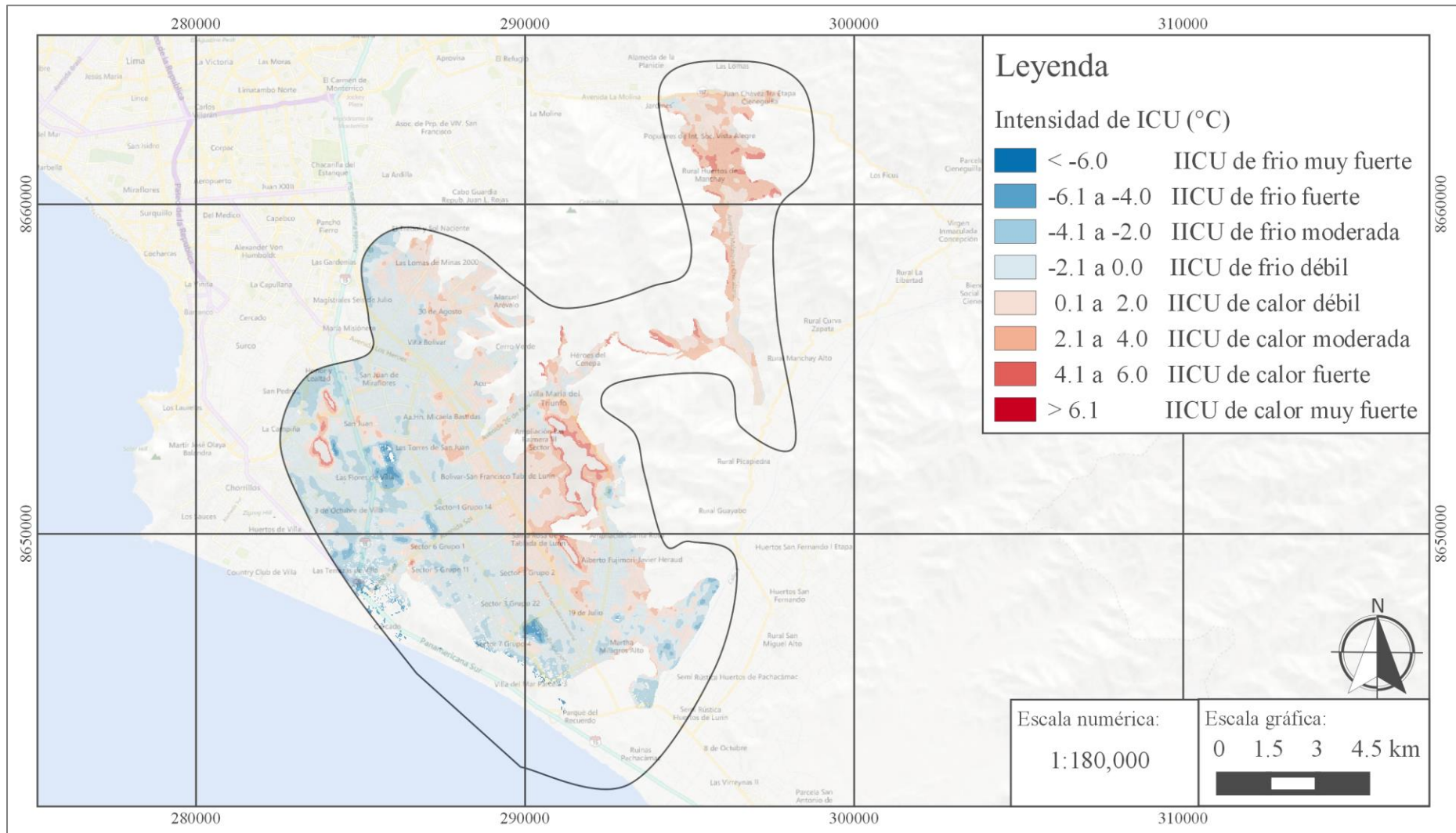


Figura 43: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona H
Elaboración propia, 2016.

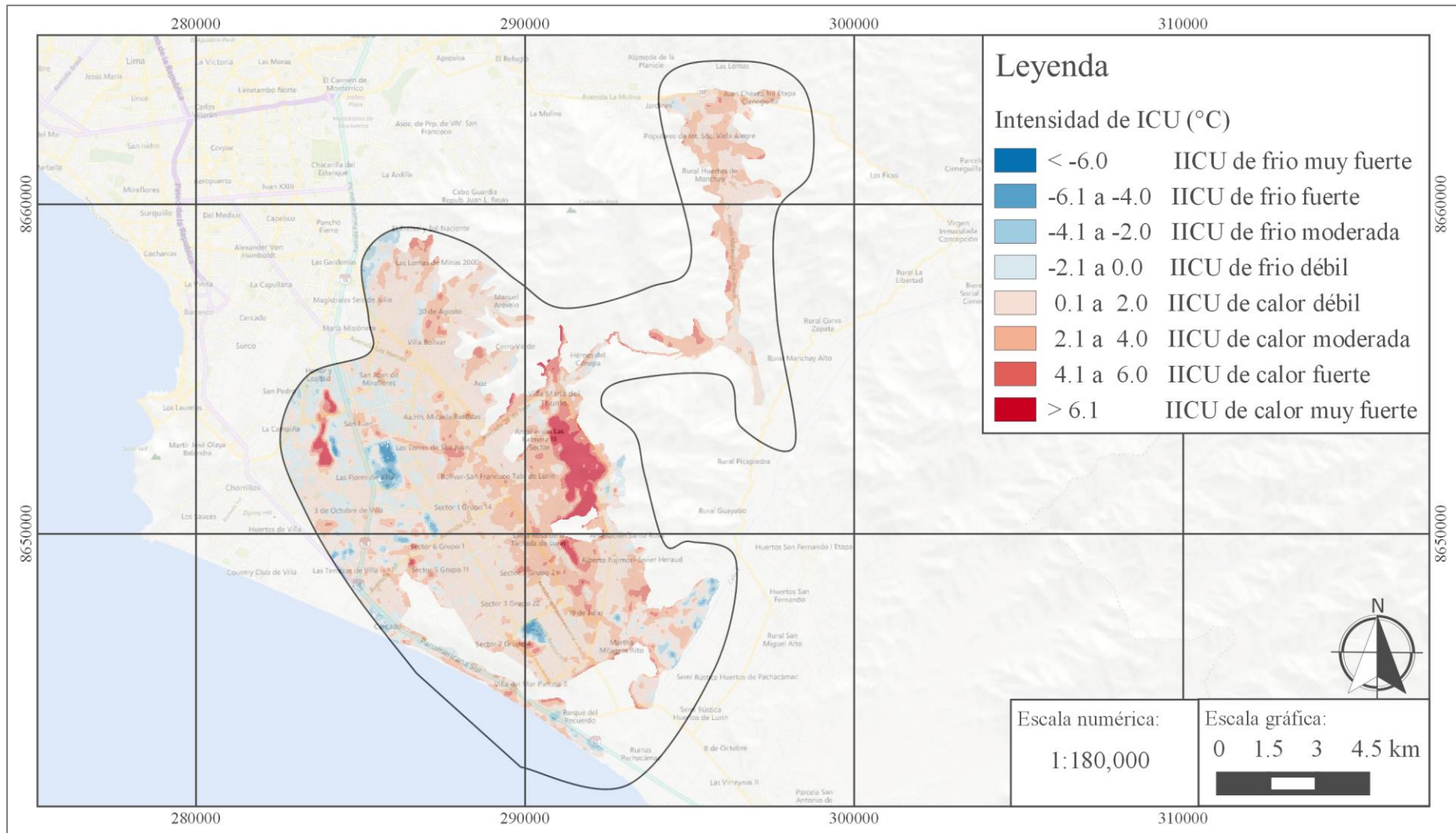


Figura 44: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona H
Elaboración propia, 2016.

Zona I. Base Aérea Las Palmas.

El 25 de Diciembre de 2013 se presentaron varias islas de calor de intensidad moderada ubicadas sobre la zona de la base aérea Las Palmas, y rodeado por islas de frío también de intensidad moderada. En la imagen del día 11 de Febrero de 2014 la extensión e intensidad (hasta intensidad muy fuerte) de las islas de calor que rodeaban la base aérea, aumentaron considerablemente. Para el día 16 de Abril de 2014, las islas de calor presentaron el mismo comportamiento que en la primera fecha estudiada, unas islas de calor de intensidad moderada rodeadas por islas de frío, de intensidad moderada también. Finalmente, el 29 de Enero de 2015 se observaron islas de calor con intensidades fuertes y ubicadas sobre la base aérea, las cuales estaban rodeadas por islas de frío de intensidades moderada. En tres (03) de los cuatro (04) días estudiados se presentaron islas de calor sobre el área de la Base aérea Las Palmas, rodeadas por islas de frío, y en la segunda fecha se observaron islas de calor extendidas a lo largo de la zona delimitada. La presencia de las islas de calor fue constante en las cuatro (04) fechas.

De manera similar a la Zona C.: Aeropuerto Jorge Chávez, el área de este aeropuerto está compuesto por las áreas de aterrizaje y despegue, las cuales son de asfalto. Este material tiene la característica de tener una alta capacidad térmica y por lo tanto podría retener y emitir energía. Este puede ser uno de los factores que han generado esta isla de calor.

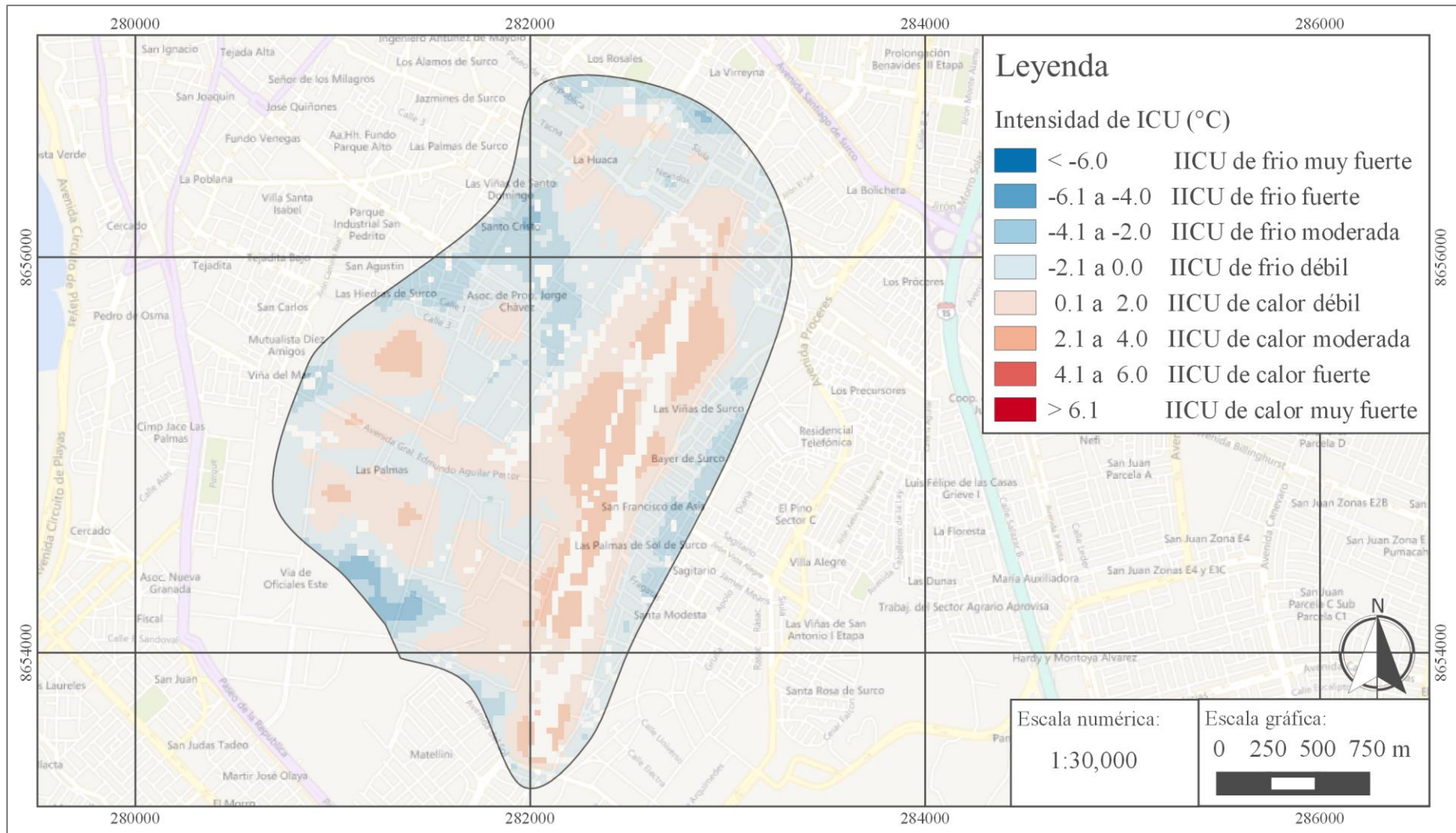


Figura 45: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona I
 Elaboración propia, 2016.

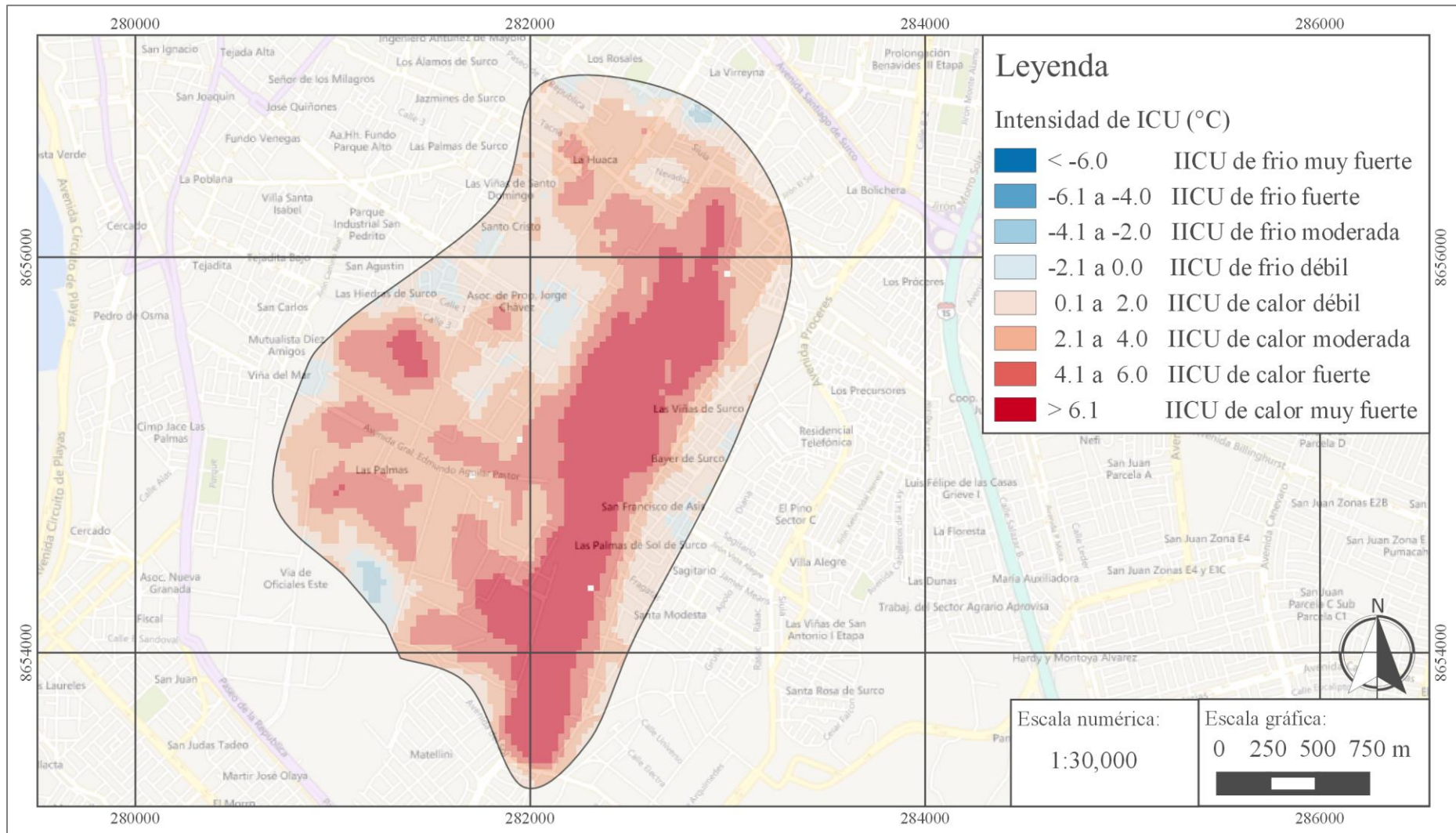


Figura 46: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona I
 Elaboración propia, 2016.

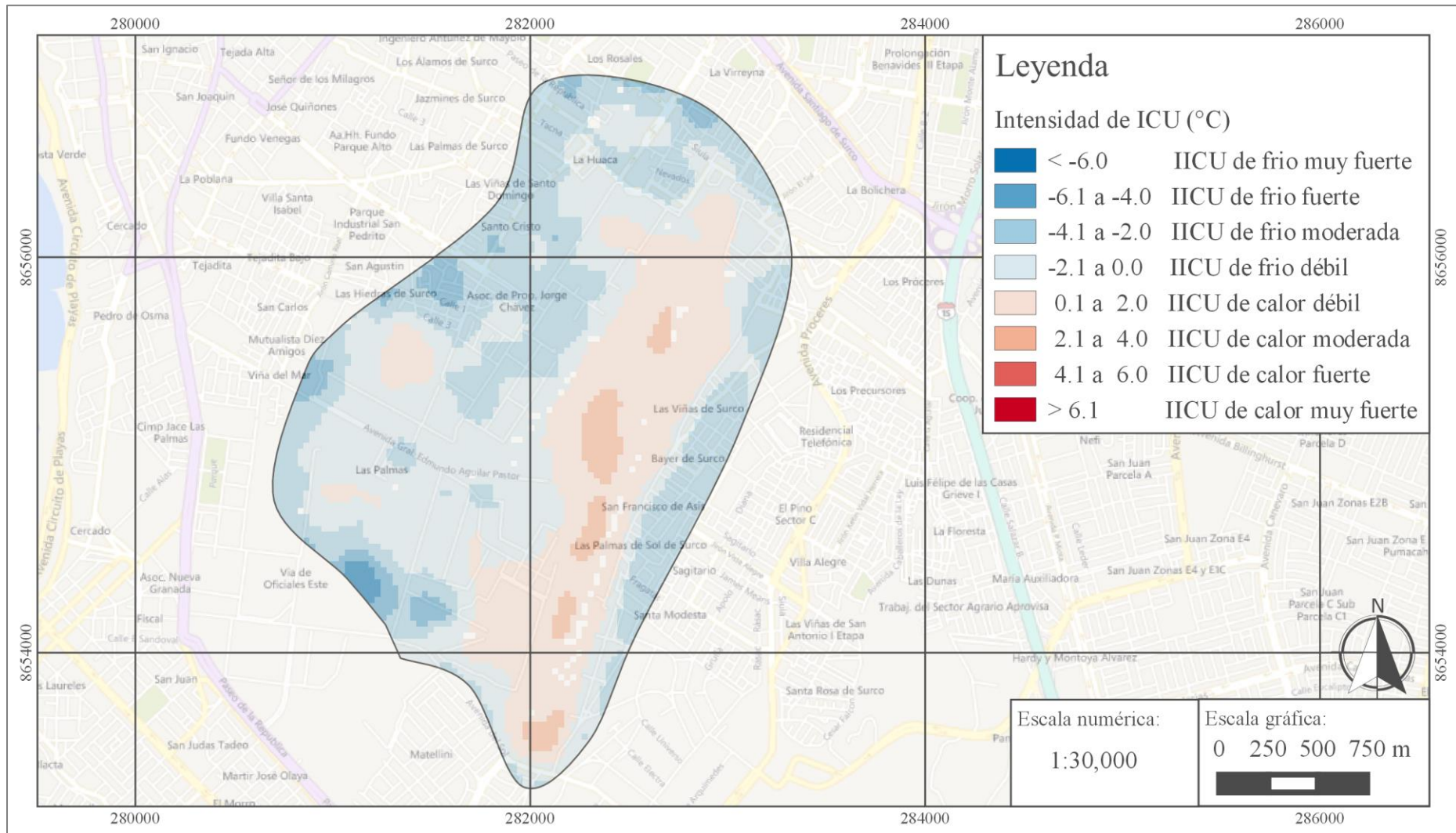


Figura 47: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona I
 Elaboración propia, 2016.

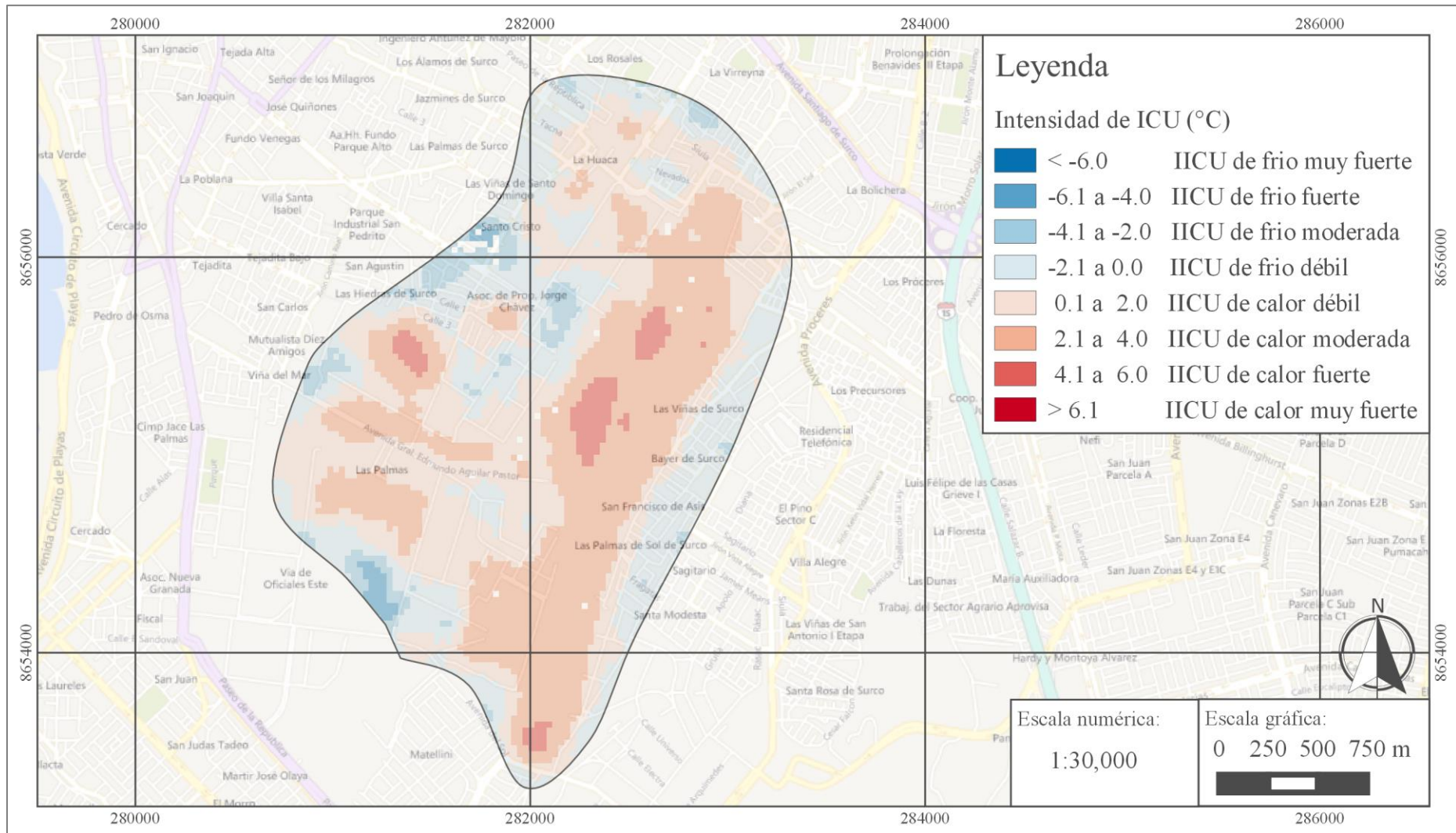


Figura 48: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona I
 Elaboración propia, 2016.

Zona J. Los Pantanos de Villa

En las cuatro (04) fechas evaluadas se observó la presencia de una isla de frío de intensidad moderada a alta sobre el área de Los Pantanos de Villa. La extensión y la intensidad de la isla suele ser constante en los días analizados.

Los posibles factores que han podido generar la isla de frío en esta zona es la presencia del humedal Los Pantanos de Villa, el cual por ser un cuerpo de agua con presencia de vegetación tiene un efecto enfriador. Esto es debido a la baja capacidad térmica del agua y alto albedo y capacidad térmica de la vegetación.

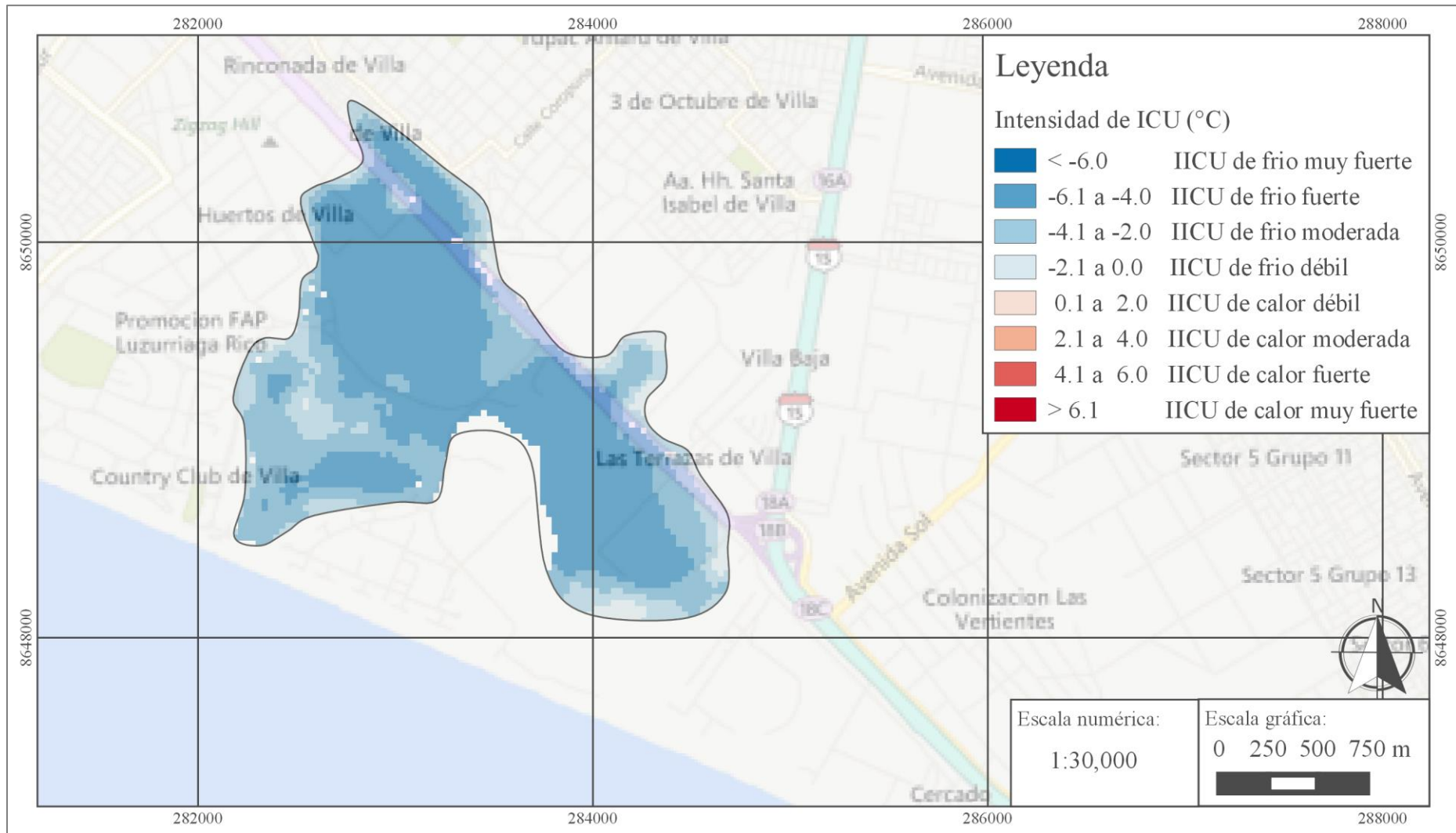


Figura 49: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13 – Zona J
Elaboración propia, 2016.

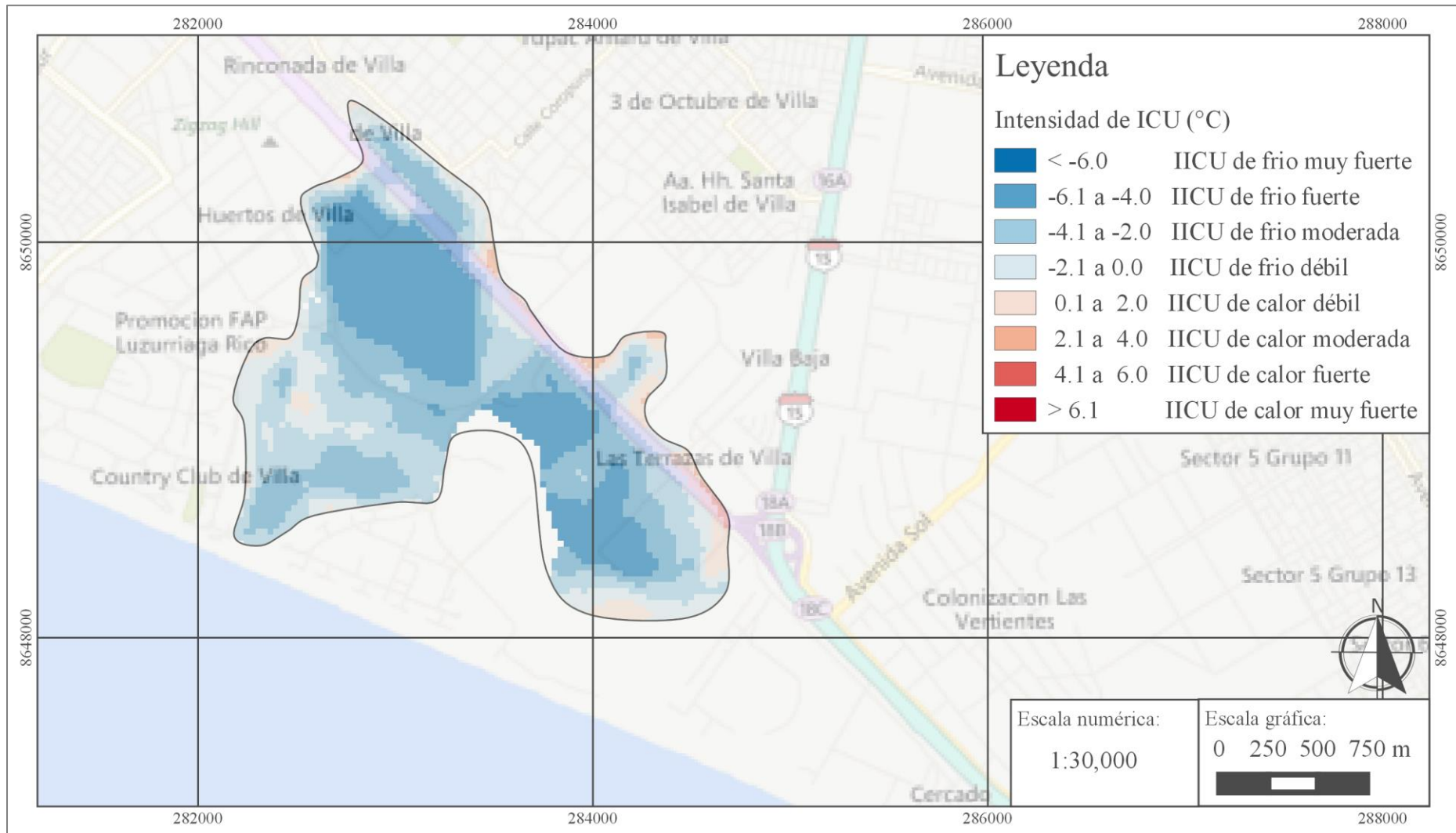


Figura 50: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14 – Zona J
 Elaboración propia, 2016.

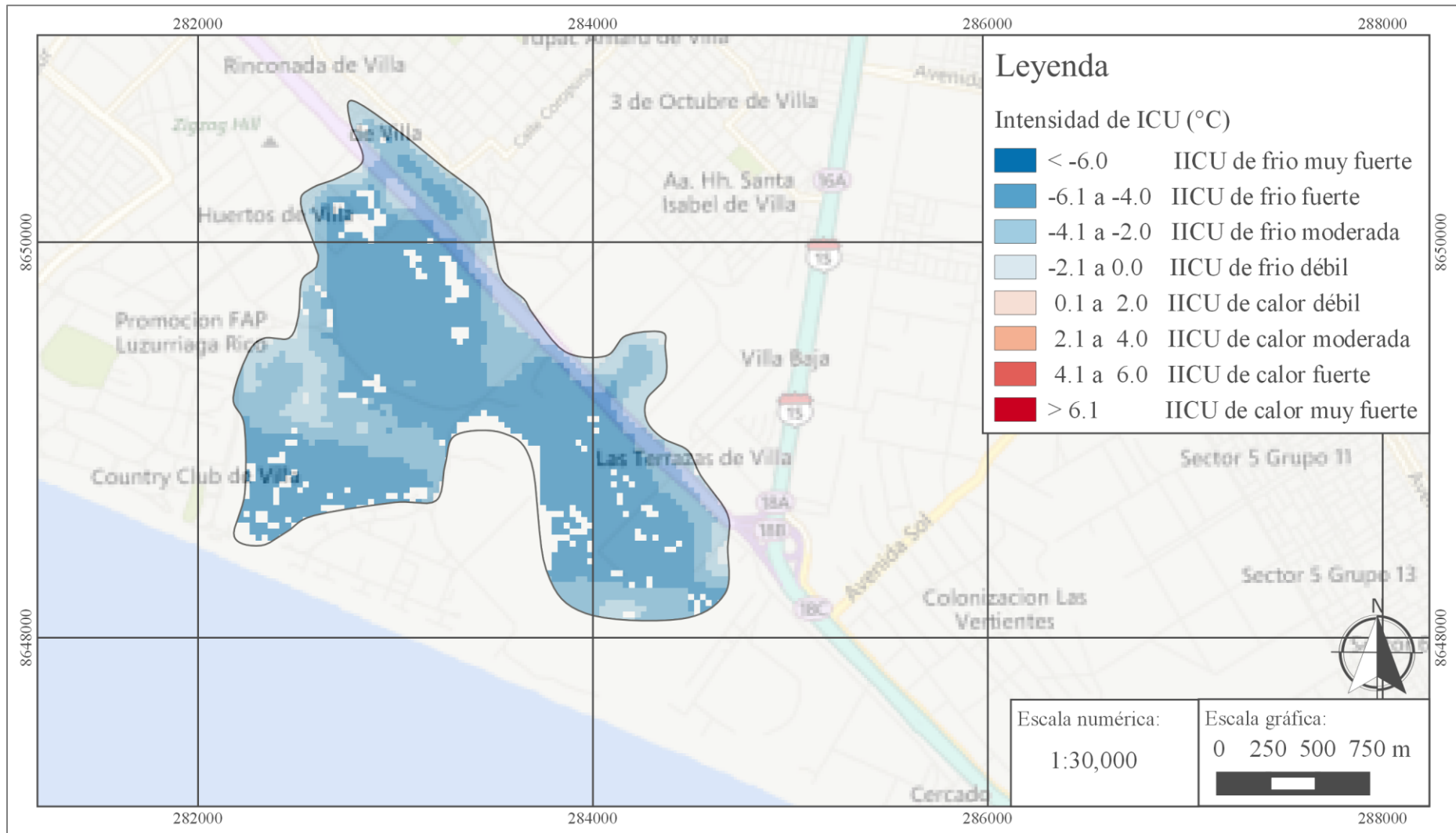


Figura 51: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14 – Zona J
 Elaboración propia, 2016.

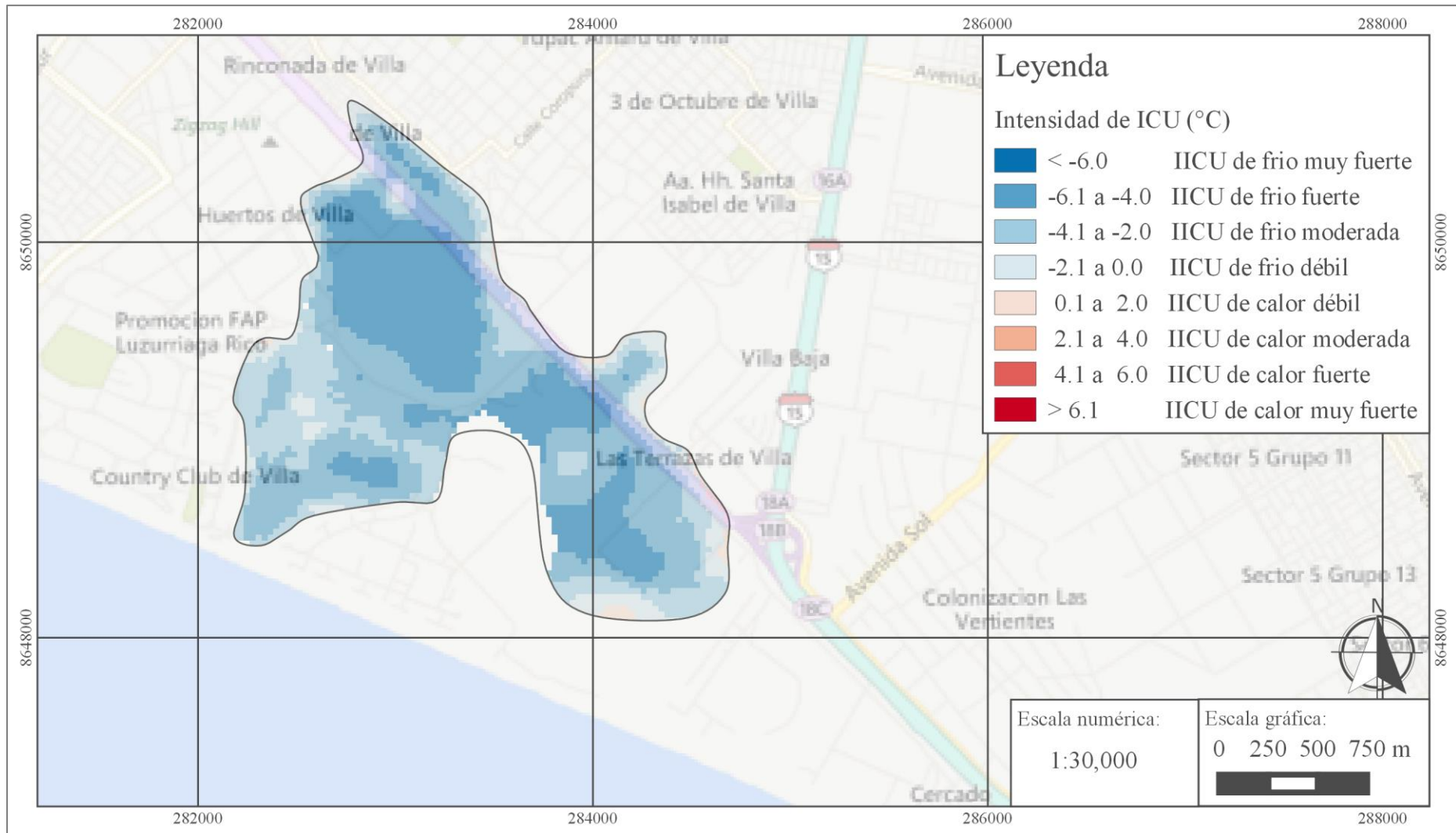


Figura 52: Intensidad de Isla de calor urbano hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15 – Zona J
 Elaboración propia, 2016.

Si bien para cada zona de evaluación se propusieron posibles factores antropogénicos que ocasionaron las islas de calor o de frío. Cabe mencionar que la variación entre los resultados de temperatura de superficie del suelo (por tanto la variación de la intensidad de Isla de Calor urbano) entre un día y otro, puede ser producto de variaciones en las condiciones naturales como la radiación, la temperatura atmosférica y la velocidad del viento. En segundo plano puede haber sido ocasionado por factores antropogénicos como la diferencia del flujo de automóviles para cada día evaluado. No se incluye la presencia de nubosidad dentro de los posibles factores naturales que podrían haber influenciado la presencia de las islas de calor o de frío, porque en esta investigación se trabajó con días despejados.

4.3. EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO

4.3.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS: LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN (NDBI), Y USO DEL SUELO

A continuación se presentan los mapas de los parámetros espaciales: elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI), y uso del suelo.

En el caso de las variables NDVI y NDBI, a continuación se presentan los valores calculados a partir de las imágenes del 25 de Diciembre de 2013, las demás fechas se presentan en el Anexo 3: Mapas de NDVI y NDBI. Además, el mapa de densidad poblacional se basó en los datos de INEI (2014), Vea el Anexo 4: Datos demográficos del INEI (2014).

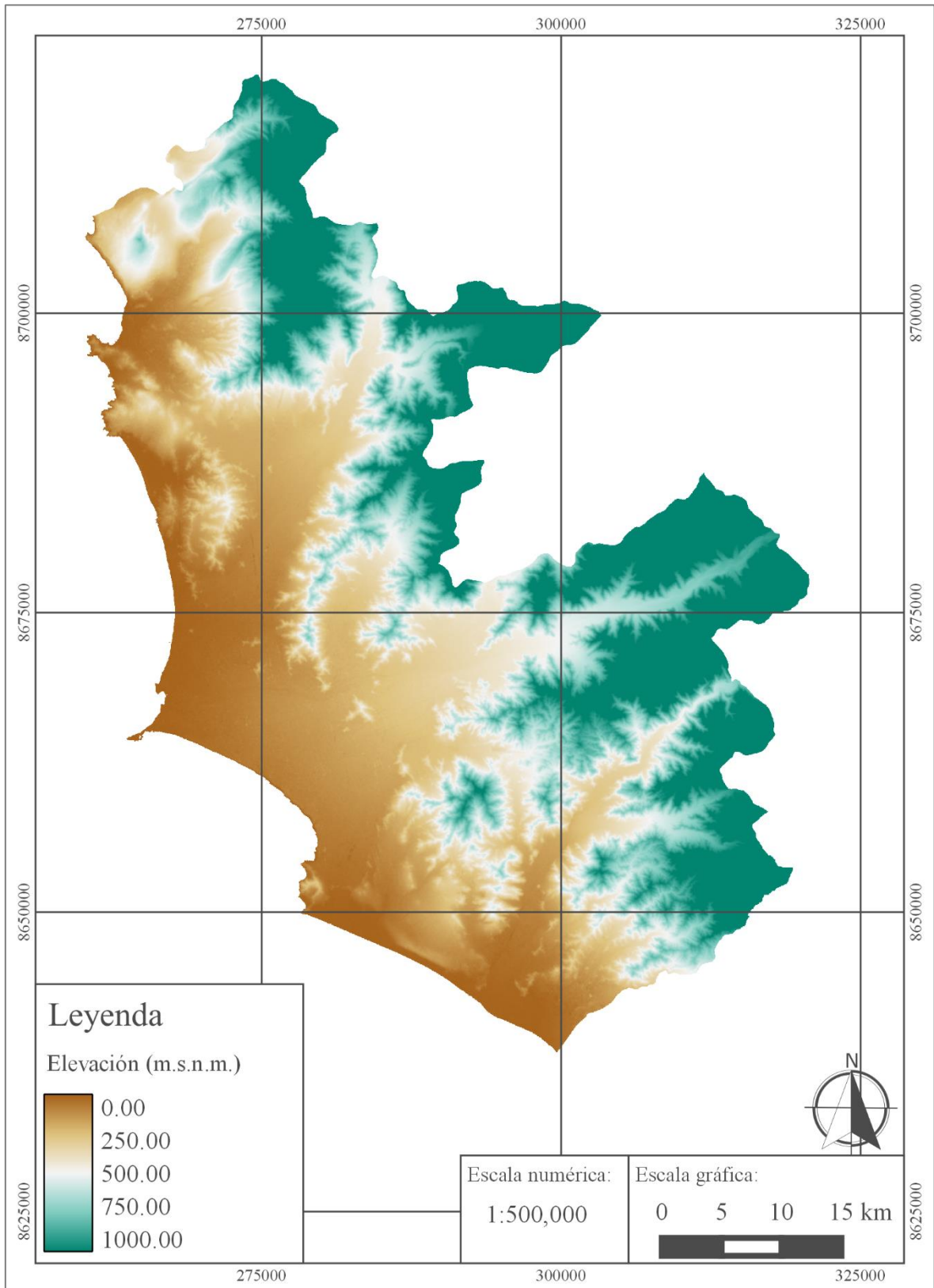


Figura 53: Elevación (m.s.n.m.) del Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

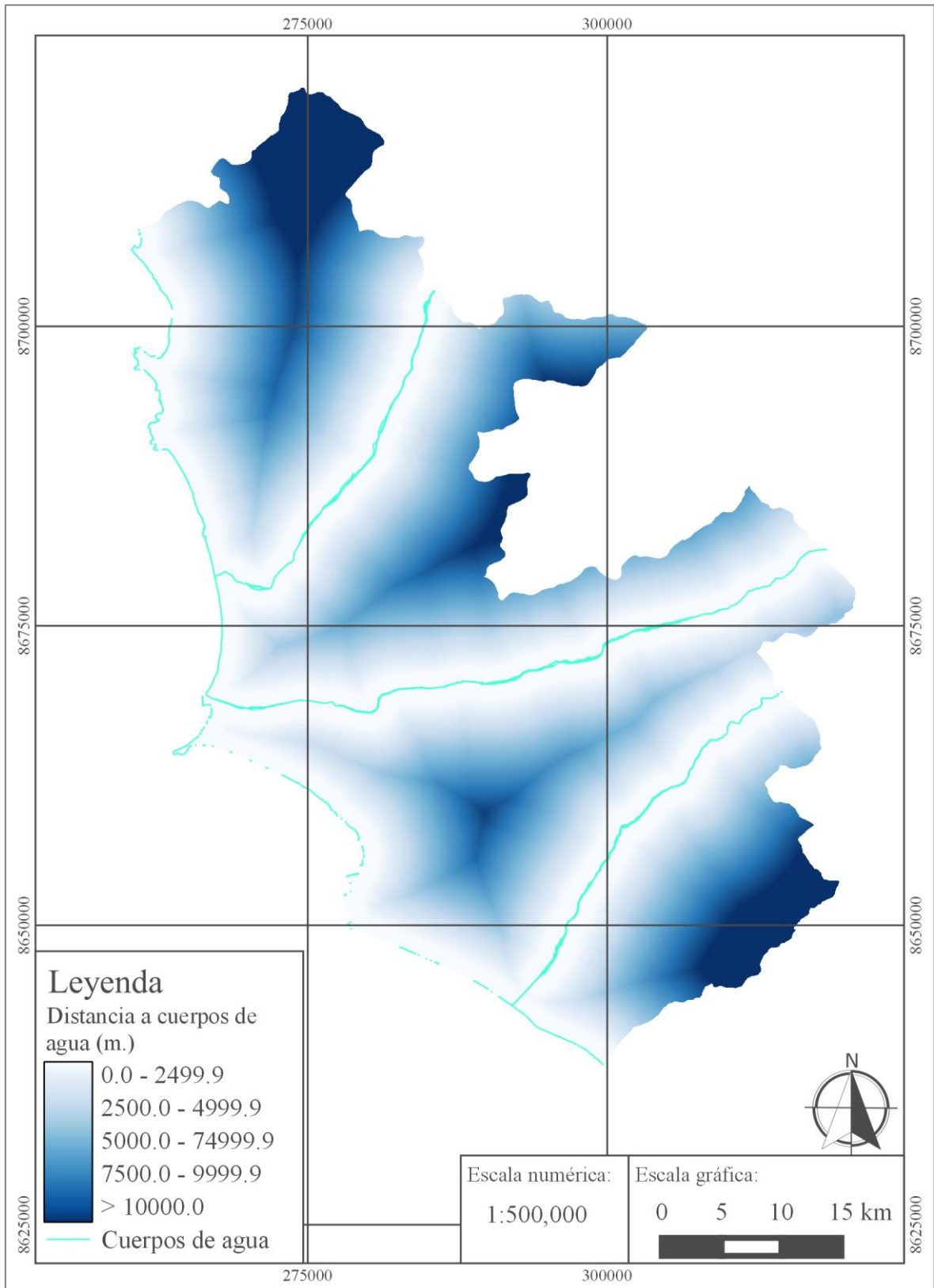


Figura 54: Distancia a cuerpos de agua (m.) del Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

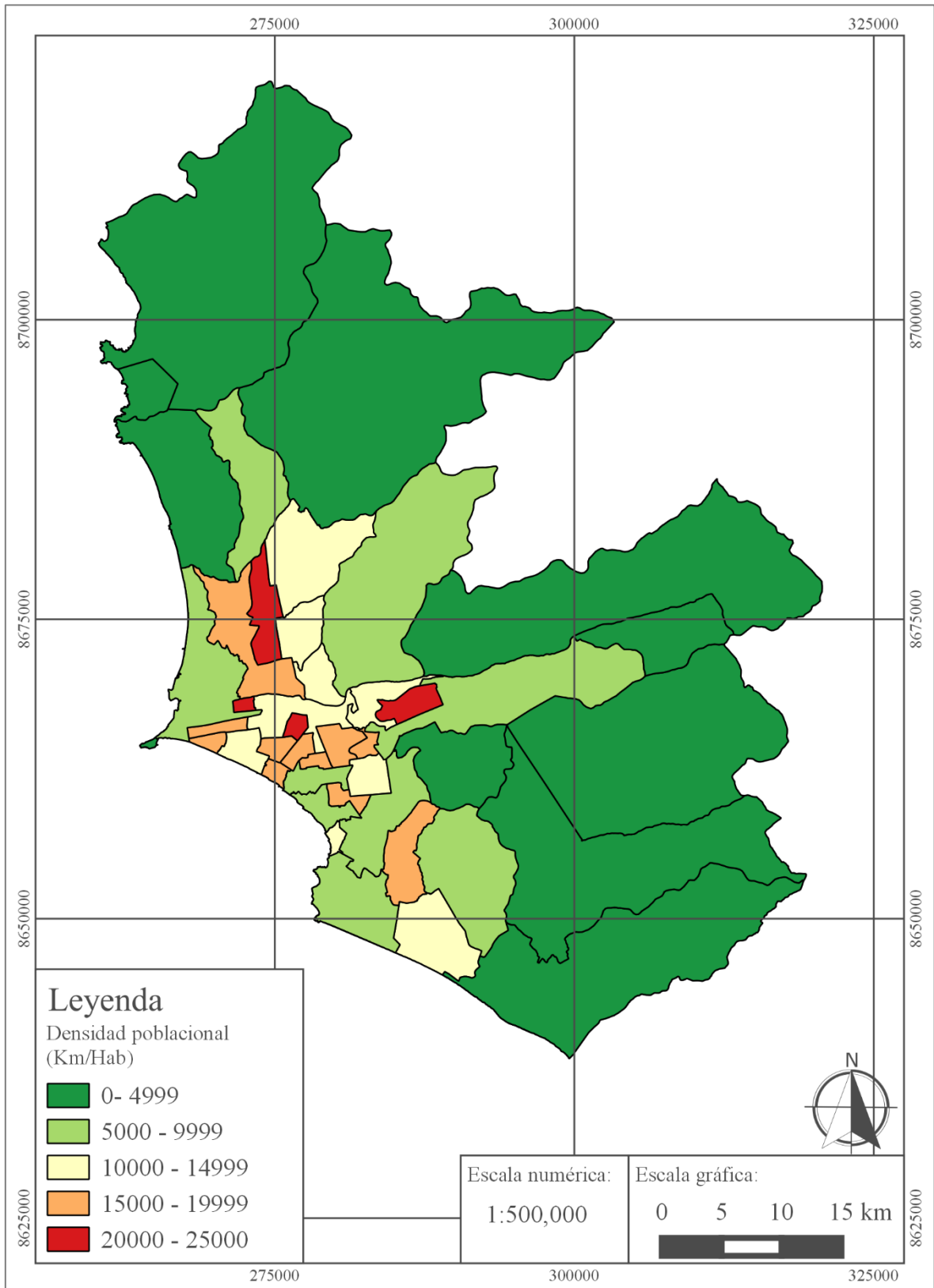


Figura 55: Densidad poblacional (Hab./Km²) del Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

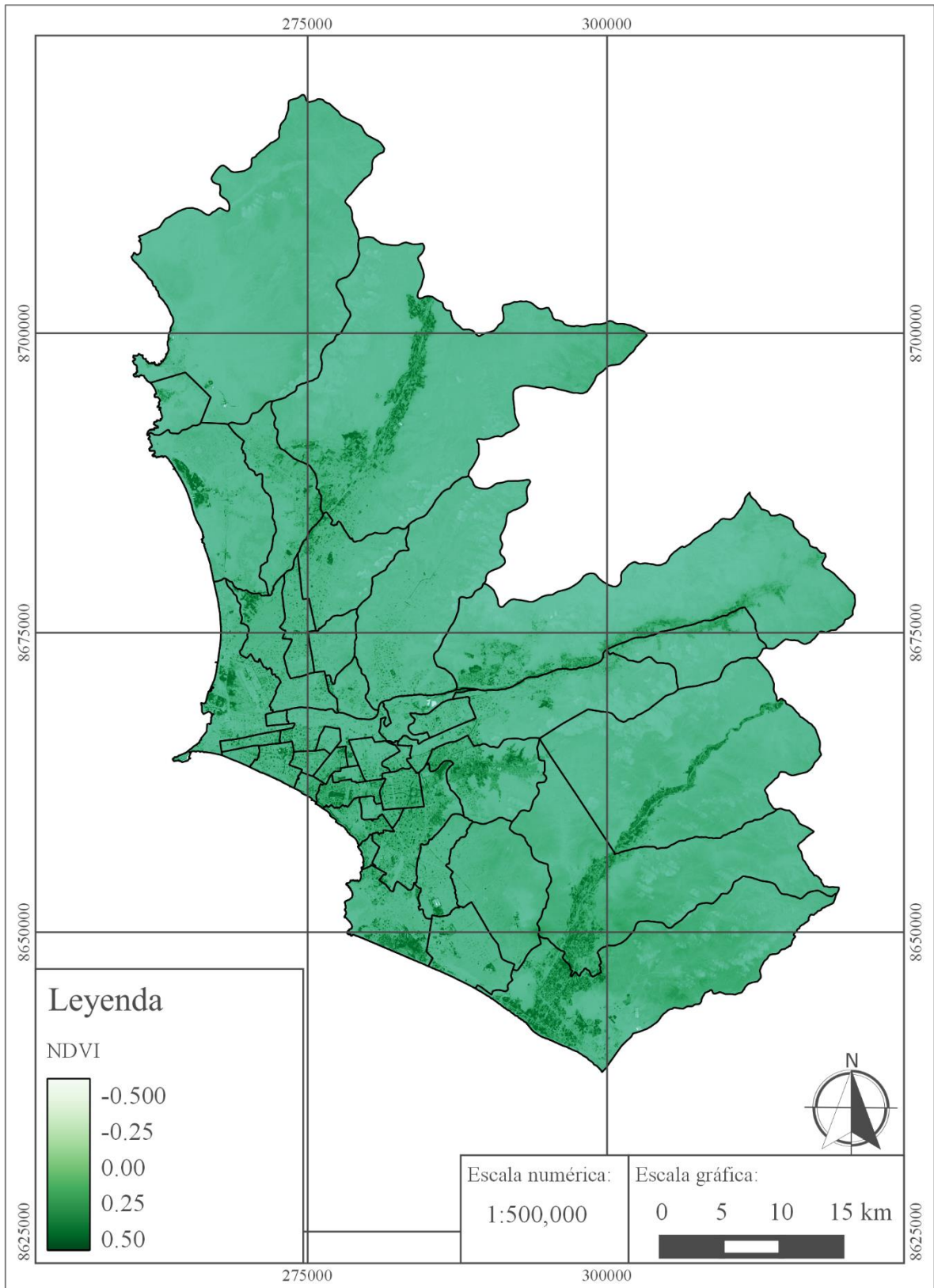


Figura 56: Valores de índice de vegetación normalizada (NDVI) el 25/12/2016 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

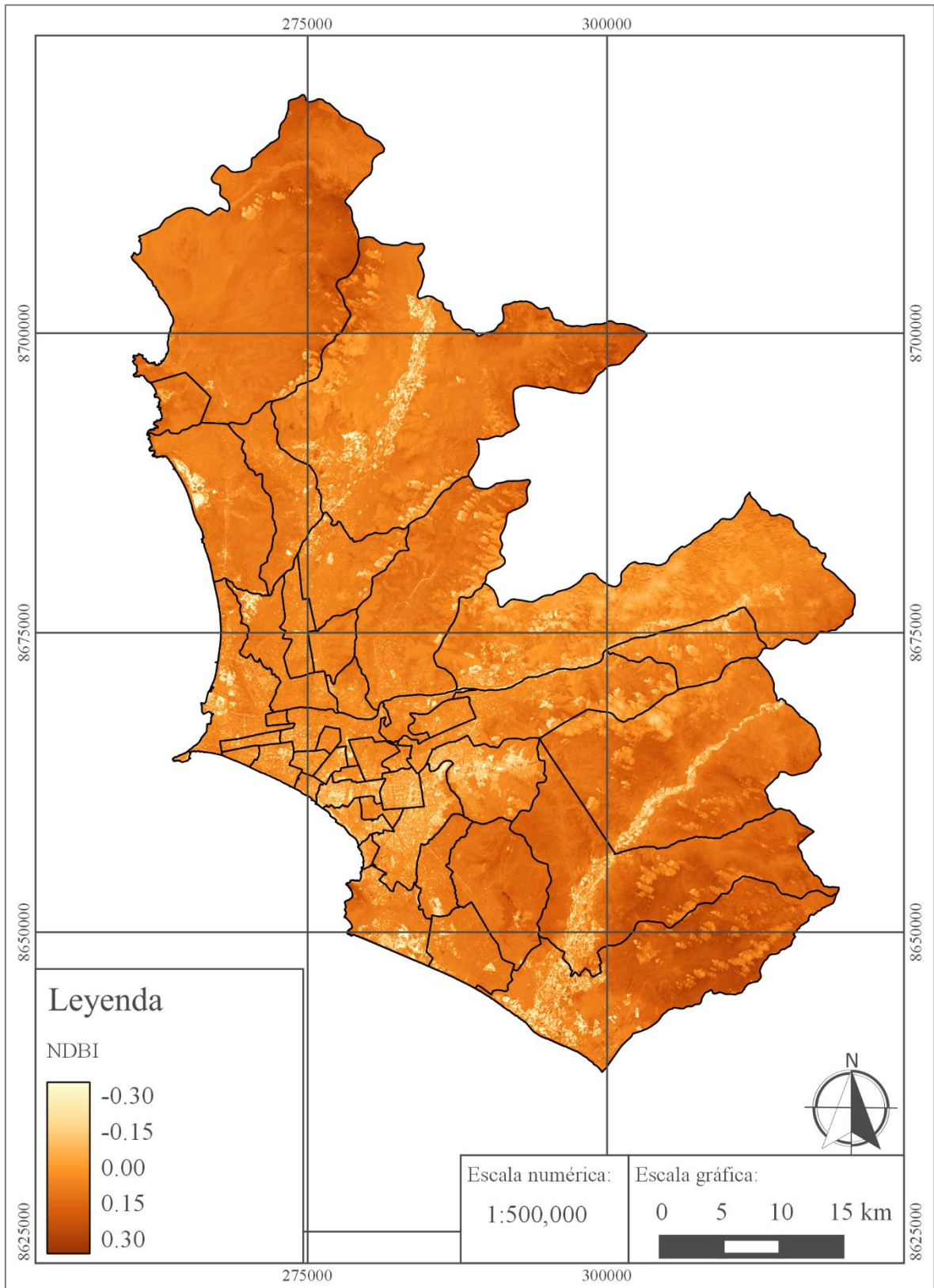


Figura 57: Valores de índice de edificación normalizada (NDBI) el 25/12/2016 en el Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

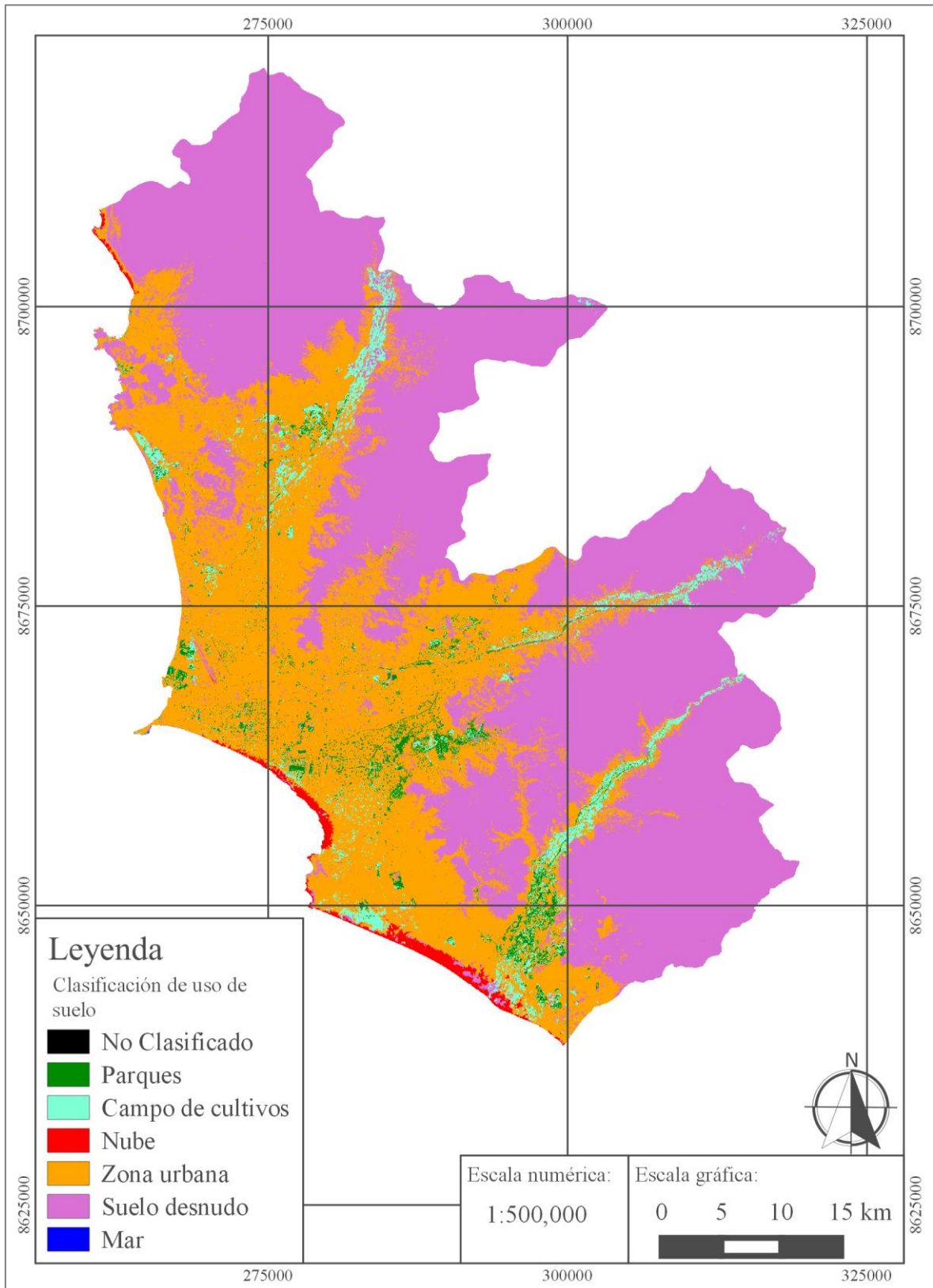


Figura 58: Clasificación de uso de suelo del Área de estudio

Elaboración propia, 2016.

4.3.2. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LA ELEVACIÓN, DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA, DENSIDAD POBLACIONAL, ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI), ÍNDICE DE EDIFICACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDBI), Y USO DEL SUELO

Una vez que se generaron los mapas de elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, NDVI, NDBI, y uso del suelo, se continuó con la determinación de la correlación estadística entre estas variables y la Intensidad de la ICU para las cuatro (04) fechas evaluadas (Vea la Tabla 18). Además se calcularon los gráficos de cajas y los de dispersión que relacionan estas variables (Vea el Anexo 5: Gráficos de dispersión y de cajas de IICU Vs Elevación, Distancia a cuerpos de agua, densidad urbana, NDVI y NDBI)

Cabe mencionar que en este capítulo se representan los resultados de las temperaturas halladas con el método SC y la ecuación de Xiaolei *et al.* (2014), ya que al ver las medianas de la Tabla 14, se puede ver que este es el método es el que presenta una mediana más similar a la mediana de la Temperatura interpolada a las 10:00horas. A pesar que la mediana de estas temperaturas no es estadísticamente iguales a la mediana de las temperaturas interpoladas.

Tabla 18: Resultados de la relación estadística para la intensidad de ICU en las fechas estudiadas para el método SC con la ecuación de Xiaolei y parámetros espaciales y demográficos

	25 Dic 13	11 Feb 14	16Abr14	29Ene15
Elevación (m.s.n.m.)	R: 0.057 R ² : 0.33% m: 0.000972 p: 0.001	R: 0.211 R ² : 4.47% m: 0.005674 p< 0.001	R: 0.218 R ² : 4.76% m: 0.002934 p< 0.001	R: -0.066 R ² : 0.44% m: -0.000825 p< 0.001
Distancia a los cuerpos de agua (m.)	R: 0.191 R ² : 3.64% m: 0.000202 p< 0.001	R: 0.219 R ² : 4.81% m: 0.000427 p< 0.001	R: 0.193 R ² : 3.71% m: 0.000189 p< 0.001	R: 0.209 R ² : 4.35% m: 0.000189 p< 0.001
Densidad urbana (Hab./Km²)	R: -0.191 R ² : 3.57% m: -0.000082 p< 0.001	R: -0.195 R ² : 3.79% m: -0.000156 p< 0.001	R: -0.249 R ² : 6.22% m: -0.000097 p< 0.001	R: 0.014 R ² : 0.02% m: 0.000005 p: 0.432 (n.s.)
NDVI	R: -0.446 R ² : 19.88% m: -10.758 p< 0.001	R: -0.187 R ² : 3.50% m: -7.578 p< 0.001	R: -0.445 R ² : 19.76% m: -10.481 p< 0.001	R: -0.511 R ² : 26.16% m: -9.954 p< 0.001
NDBI	R: 0.531 R ² : 28.23% m: 18.280 p< 0.001	R: 0.395 R ² : 15.63% m: 24.489 p< 0.001	R: 0.581 R ² : 33.77% m: 19.165 p< 0.001	R: 0.639 R ² : 40.89% m: 17.852 p< 0.001
Uso de suelo	R: 0.384 R ² : 14.75% m: 1.5037 p< 0.001	R: 0.246 R ² : 6.05% m: 1.833 p< 0.001	R: 0.441 R ² : 19.41% m: 1.6278 p< 0.001	R: 0.425 R ² : 18.03% m: 1.4464 p< 0.001

R: Coeficiente de correlación de Pearson (-1 a +1)

R²: Coeficiente de determinación (0% a 100%)

m: Pendiente de la relación estadística

p: P - valor para la pendiente (con una significancia de 0.05)

(n.s.): No significativo para una significancia de 0.05

Elaboración propia, 2016

La relación entre la elevación y la Intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y ligeramente positiva para las fechas 25 de Diciembre de 2013, 11 de Febrero de 2014 y 16 de Abril de 2014. Lo que implica que para estas tres (03) fechas a mayor elevación se obtuvieron mayores valores de Intensidad de la ICU.

Además, la relación entre la distancia de los cuerpos de agua y la Intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y ligeramente positiva para los cuatro (04) días evaluados. Lo

cual implica que a mayor distancia de los cuerpos de agua habrá mayor Intensidad de la ICU, de esta manera se confirma el efecto enfriador de los cuerpos de agua, al igual que lo reportado por el estudio de Do Santos *et al.* (2013).

Paralelamente, la densidad urbana y la Intensidad de la ICU tienen una relación estadísticamente significativa y ligeramente negativa (con excepción de la relación entre estas variables medidas para el día 29 de Enero de 2015, cuando la correlación es no significativa). Este resultado se comporta de manera diferente a lo esperado según señala Do Santos *et al.* (2013), en esta investigación se determinó que a mayor densidad urbana hay mayores niveles de temperatura de brillo. Esta diferencia entre los resultados y la bibliografía consultada puede ser debido a que la densidad urbana se ha manejado como una característica que es homogénea a lo largo de cada distrito, sin embargo esta característica no se comporta así en la realidad. Esto podría haber llevado a cometer errores que finalmente se ven reflejados en relaciones estadísticas negativas.

A su vez, la asociación entre el NDVI y la Intensidad de la ICU tienen una relación estadísticamente significativa y fuertemente negativa. Lo que implica que en zonas con más vegetación y con vegetación más sana, se tienen valores de temperatura más bajos. Este resultado es similar a lo encontrado por Lin y Yuanzhi (2011) y Do Santos *et al.* (2013).

De la misma manera, el NDBI y la Intensidad de la ICU tiene una asociación estadísticamente significativa y fuertemente positiva. Por lo cual, se asume que en zonas más edificadas y densamente construidas, se espera mayor temperatura, como lo encontraron Lin y Yuanzhi (2011) y Do Santos *et al.* (2013).

La relación entre el uso del suelo y la Intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y fuertemente positiva, por lo tanto se puede afirmar que la menor temperatura se encontrará en los campos de cultivo, luego en los parques, los que tendrán menor temperatura que las zonas urbanas y estos últimos tendrán menor temperatura que las áreas de suelo desnudo. Rajeshwari y Mani (2014) encontraron resultados similares (una relación positiva entre el uso de suelo y la IICU) pero con una clasificación ligeramente diferente: en orden ascendente lo clasificó: en zonas elevadas y con alta densidad de vegetación, regiones de piedemonte y las llanuras de cultivo, regiones áridas y superficie altas.

4.4. ESTABLECER RELACIONES DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS NO, NO₂, SO₂, O₃ Y PM₁₀.

Luego se buscó conocer la relación estadística entre las concentraciones de los contaminantes NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ (Vea la Tabla 19) y los valores de Intensidad de ICU para las fechas estudiadas en la ubicación de las estaciones.

Tabla 19: Concentración de contaminantes reportados por el SENAMHI

ESTACIÓN	PARÁMETRO	25/12/2013 - 10:00 am	11/02/2014 - 10:00 am.	16/04/2014 - 10:00 am	29/01/2015 - 10:00 am
ATE	NO (ppb)	24.2	64.6	49.3	-
	NO ₂ (ppb)	7.2	30.1	45.5	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	2.9	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	71.0	251.4	309.6	251.5
SAN BORJA	NO (ppb)	-	47.9	56.4	-
	NO ₂ (ppb)	-	13.1	14.9	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	5.7	4.9	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	34.4	62.0	47.4	25.9
SANTA ANITA	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	7.8	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	145.7	139.6
SAN JUAN DE LURIGANCHO	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	231.2	115.5

(-) Valor no reportado por SENAMHI

Elaboración propia, 2016

Tabla 19: Concentración de contaminantes reportados por el SENAMHI

(Continuación)

ESTACIÓN	PARÁMETRO	25/12/2013 - 10:00 am	11/02/2014 - 10:00 am.	16/04/2014 - 10:00 am	29/01/2015 - 10:00 am
CARABAYLLO	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	184.8	152.1
SAN MARTIN DE PORRES	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	95.7	-
PUENTE PIEDRA	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	214.9	123.0
VILLA MARIA DEL TRIUNFO	NO (ppb)	12.3	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	10.3	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	72.1	-	134.9	190.6
CAMPO DE MARTE	NO (ppb)	4.8	7.7	-	-
	NO ₂ (ppb)	3.7	4.5	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	2.8	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	17.5	77.5	74.1	59.7

(-) Valor no reportado por SENAMHI

Elaboración propia, 2016

Con los datos de concentración de contaminantes y los valores de Intensidad de ICU (°C) se determinaron la correlación (Coeficiente de Correlación – R y Coeficiente de determinación– R²), la pendiente de la relación estadística (m) y el P - valor de la pendiente (Vea la Tabla 20).

Tabla 20: Resultados de la relación para la intensidad de ICU en las fechas estudiadas y Contaminantes

	Intensidad de ICU (°C)
NO	R: 0.528 R ² : 27.88% m: 0.0459 p: 0.179 (n.s.)
NO ₂	R: 0.296 R ² : 8.79% m: 0.0424 p: 0.476 (n.s.)
SO ₂	*
O ₃	R: 0.174 R ² : 3.02% m: 0.154 p: 0.780 (n.s.)
PM ₁₀	R: 0.382 R ² : 14.62% m: 0.00779 p: 0.065 (n.s.)

R: Coeficiente de correlación de Pearson (-1 a +1)

R²: Coeficiente de determinación (0% – 100%)

m: Pendiente de la relación estadística

p: P - valor para la pendiente (con una significancia de 0.05)

(n.s.): No significativo

* No se han obtenido resultados porque hay menos de tres pares de puntos.

Elaboración propia, 2016

Los P - valores para los modelos de correlación entre los contaminantes evaluados y la intensidad de ICU estudiada es no significativa ($\alpha = 0.05$), por lo tanto es posible afirmar que no hay suficiente evidencia estadística para afirmar una asociación entre las variables de contaminantes estudiados y la Intensidad de ICU.

Si bien se espera que a mayor concentración de los gases de efecto invernadero haya una mayor Intensidad de ICU (EPA, 2009). Además a mayor concentración de SO₂ y NO_x hubieron mayores valores de la Temperatura de superficie del suelo (Weng y Yang, 2006 - Vea la Tabla 11). En esta investigación se obtuvieron resultados que contradicen lo encontrado

en la bibliografía Esto puede que haya sido debido a la baja cantidad de puntos analizados en esta evaluación. En donde para las cuatro (04) fechas evaluadas y nueve (09) estaciones de calidad ambiental no se reportaron valores de concentración para todas las fechas y estaciones.

V. CONCLUSIONES

1. Se han identificado cualitativamente diez (10) zonas de evaluación en la zona de estudio y para las fechas evaluadas. Estas zonas presentan islas de calor y/o de frío que en su mayoría son de extensión y ubicación variable, y no todas fueron permanentes durante los cuatro (04) días evaluados.
2. Se determinó que hay relaciones estadísticamente significativas entre la Intensidad de la Isla de calor urbano (IICU) y la elevación, la distancia a los cuerpos de agua, la densidad urbana, el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y el uso de suelo. Se obtuvo que hay una leve relación positiva entre la elevación y la IICU (menos el 29 de Enero de 2015) así como también una leve relación positiva entre la distancia a los cuerpos de agua y la IICU, también se determinó que hay una relación negativa entre la densidad urbana y la IICU (las relaciones fueron estadísticamente significativa para todos los días evaluado, menos el 29 de Enero de 2015), por otro lado hay una fuerte relación fuertemente negativa entre el NDVI y la IICU, además hay una fuerte relación fuertemente positiva entre el NDBI y la IICU y finalmente hay una relación positiva con el uso de suelo (Campos de cultivo, Parques, Suelo Desnudo y Zona edificada en ese orden) y el IICU. Los coeficientes de correlación (R) más resaltantes fueron $R=0.639$ para la relación entre NDBI y la IICU del 29 de Enero de 2015 y $R=0.441$ para la relación entre el Uso de suelo y la IICU de 16 de Abril de 2014.
3. Con los datos de contaminantes atmosféricos obtenidos se ha determinado que no hay una relación estadística entre la IICU y los contaminantes NO, NO₂, O₃ y PM₁₀. Los P – valores obtenidos para los modelos de correlación realizados entre estas variable varían entre 0.780 y 0.065, valores mayores a 0.05 ($\alpha=0.05$). Por lo tanto, con una significancia de 0.05, se puede decir que las relaciones son no significativas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Si bien al comparar las temperaturas obtenidas con los métodos *Single Channel* (SC) y *Split Window* (SW) no se obtuvo que alguna de las medias fuera estadísticamente igual a la media de las temperaturas interpoladas a las 10:00 horas (hora aproximada de paso del satélite), por lo cual no se pudo definir estadísticamente si los resultados obtenidos con uno de los dos métodos fuera el mejor. Sin embargo al comparar únicamente las medianas de los conjuntos de temperaturas se obtuvo que el método SC arrojó mejores resultados. Además Jiménez-Muñoz, *et al.* (2015) realizó un estudio sobre el Lago Titicaca usando imágenes Landsat 8, en donde trabajó con la metodología SC. Por lo tanto es más recomendable el uso de la metodología SC al buscar obtener información de temperatura con las imágenes Landsat 8 en el área de estudio definido.
2. Al realizar evaluaciones con imágenes satelitales, se recomienda trabajar con imágenes sin presencia de nubes para el área de estudio, debido a que ellas alteran los resultados que se obtendrían sobre las zonas en el área con nubosidad.
3. Medir en campo valores de la temperatura de suelo a las 10:00 horas (hora aproximada de paso del satélite Landsat 8 usado en este estudio) para así poder validar y calibrar los resultados de temperatura calculados en este estudio, o en su defecto realizar una interpolación válida para este parámetro medido en las condiciones de Lima Metropolitana.
4. Se sugiere repetir este estudio con las imágenes satelitales MODIS, si bien tiene una menor resolución espacial (300 m.), este satélite proporciona información de vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2). Con esta data se eliminaría el error generado por el uso de un vapor de agua atmosférico contante a lo largo de toda el área estudiada, como se dio en esta investigación.
5. Se recomienda realizar un análisis de correlación con valores de Temperatura de superficie del suelo y la Concentraciones de contaminantes atmosféricos para un periodo de tiempo más amplio (por ejemplo se podría trabajar con las bandas térmicas del Landsat 5 o Landsat 7). De esta manera se podrá tener una mayor cantidad de datos con lo cual se podría afirmar o rechazar la relación no significativa entre los

- contaminantes atmosféricos evaluados y la ICU, encontrado en esta investigación.
6. Realizar otro estudio para evaluar la ICU en Lima Metropolitana, con el objetivo de estudiar este efecto en otros periodos, como durante todo el día, en las noches o en invierno. Si se realizara un estudio durante las noches o en invierno sería posible conocer los valores mínimos de la ICU en Lima Metropolitana. Para esta investigación se recomienda utilizar imágenes satelitales que tomen información durante la noche o su defecto colocar una alta densidad de estaciones meteorológicas.
 7. Se recomienda tomar mediciones meteorológicas en todas las estaciones de calidad del SENAMHI.
 8. Considerando que la presencia de vegetación es un factor que afecta negativamente la presencia de la Isla de Calor urbano (ICU), se recomienda la construcción de áreas verdes en las zonas identificadas como islas de calor urbano con el objetivo de disminuir este efecto.
 9. Esta investigación puede ser utilizada como un soporte técnico para la construcción de áreas verdes dentro zonas con marcada presencia de ICU en el área de estudio. Esto implica que podría ser una herramienta usada por los tomadores de decisiones en el campo de planificación urbana en Lima Metropolitana.
 10. Si se quisiera invertir esfuerzos en la disminución de ICU sería recomendable comenzar con las zonas de Lima Centro y Santa Anita (Zona E) y alrededor de la Avenida Argentina (Zona D), debido a que son las zonas con mayor presencia de Islas de Calor Urbano y mayor densidad poblacional. Lo que implicaría que disminuir la presencia de la ICU tendría un mayor impacto sobre la población Limeña.
 11. Se recomienda realizar un análisis de Conglomerados a la distribución de las islas de calor y de frío.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akbari, H. (2005). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. Recuperado el 16/07/15 a las 23:28 de:
<http://escholarship.org/uc/item/4qs5f42s>
2. Barros, P. (2010). Modificaciones térmicas en la ciudad de Lima: Análisis de la presencia de Isla de Calor Urbano. (Tesis de pregrado). Departamento de Ing. Ambiental, Física y Meteorología.
3. do Brito T. L. F., Cintra D. P., do Couto Fernandes M. (2015). Estudo de ilhas de calor na baixada de Jacarepaguá/RJ a partir do canal termal infravermelho termal do Sensor TM/LANDSAT 5. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.
4. Chuvieco, E. (2010). Fundamentos de teledetección espacial. (2a ed.). Madrid: Ediciones Rialp, S. A.
5. Czarnecka, Małgorzata y Nidzgorska-Lencewicz, Jadwiga. (2014). Intensity of Urban Heat Island and Air Quality in Gdańsk during 2010 Heat Wave. Polish Journal of Environmental Studies, 23 (2), 329-340.
6. ENVI. (2013). ENVI Help. Recuperado el 28/07/15 a las 11:32 de:
http://www.exelisvis.com/docs/using_envi_Home.html
7. EPA. (2009). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.
8. Fortuniak K, Kłysik K., Wibig J. (2006). Urban–rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. Theoretical and Applied Climatology, 91–101. DOI 10.1007/s00704-005-0147-y.
9. Gartland, L. (2008). Heat Islands. Understanding and mitigating heat in urban areas. Nueva York: Taylor & Francis.
10. INEI (2014). Una Mirada a Lima Metropolitana. Setiembre 2014. Lima –Perú.
11. Institut de recherche pour le développement, 2011. Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao.
12. Javed M., Chander K. S., Shashtric S., Atiqur R., Mukherjee S. (2012). Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city. 348–358.

13. Jiménez-Muñoz J. C., Llinares, M., Ruiz, A., Tenjo, C., Delegido, J., Sobrino, J. A., Moreno, J. (2015). Propiedades ópticas y térmicas del lago Titicaca a partir de imágenes Landsat-8 y MODIS. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*
14. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C. y Cristóbal J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (10), 1840 – 1843.
15. Jiménez-Muñoz J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Sòria, G., Ninyerola, M. y Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (1), 339 – 349.
16. Kahalid, N. J. (2014). Urban Heat Island in Erbil City. (Tesis de Maestría). Department of Physical Geography and Ecosystems Science, Lund University.
17. Li H. y Liu Q. (2008). Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery. *International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA)*. doi: 10.1117/12.815679.
18. Lin L. y Yuanzhi Z. (2011). Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Remote Sensing*. 1535-1552. doi:10.3390/rs3071535.
19. Lo, C.P. y Quattrochi, D. A. (2003). Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote Sensing Approach. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 69 (9), 053–1063.
20. Magge, N., Curtis, J. y Wendler, G. (1999). The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, 39-47.
21. Mitchell, B. C. (2011). Urbanization and Land Surface Temperature in Pinellas County, Florida. (Tesis de maestría). Recopilado el 15/07/15 a las 19:50 de <http://scholarcommons.usf.edu/etd/3250>.
22. NASA. (s.f.). Buscador Reverb Echo. Recopilado el 15/07/15 a las 19:50 de <http://reverb.echo.nasa.gov/>
23. Natural Resources Canada - NRCAN. (2014). *Fundamentals of Remote Sensing*.
24. Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. (2a ed.). Editorial Taylor & Francis.
25. Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 268-277. Recopilado el 16/07/15 a las 9:30 de: <http://dx.doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>

26. Rajeshwari, A. y Mani N. D. (2014). Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District using Landsat 8 Data. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03 (05), 268-277.
27. Remote Sensing Systems. (s.f.). Atmospheric water vapor. Recuperado el 22 de Julio de 2016 a las 10:30 de: <http://www.remss.com/measurements/atmospheric-water-vapor>
28. Rizwan, A. M., Dennis Y.C., Liu C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 120–128.
29. do Santos F. B, Gomes H. B., da Silva Azevedo C. D. (2013). Análise da Formação de Ilhas de Calor em Fortaleza-CE por meio de imagens de satélite. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
30. SENAMHI, 2016. Boletín Vigilancia de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Lima y Callao, Abril del 2016. Recuperado el 11 de mayo de 2016 a las 8:25 de: <http://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-35.pdf>
31. Skoković, D., Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Sòria, G., Julien, Y., Mattar, C. y Cristóbal, J. (2014). Calibration and Validation of land surface temperature for Landsat8- TIRS sensor.
32. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz J. C. y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90 (2004) 434–440.
33. Sobrino, J. A., Li, Z-L., Stoll, M. P. y Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (02), 2089-2114.
34. USGS. (2015). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Versión 1.0. Recuperado el 02/07/15 a las 13:02 de: <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
35. USGS. (2014a). Routine ASTER Global Digital Elevation Model. Recuperado el: 15/07/15 a las 19:50 de: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table/astgtm
36. USGS. (2014b). What are the band designations for the Landsat satellites? Recuperado el: 15/07/15 a las 19:50 de: http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php
37. Vila, A., Sedano, M., López, A. y Juan, A. (s.f.). Correlación lineal y análisis de regresión. Recuperado el 20/07/16 a las 20:30 de: <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/RegresionLineal.pdf>
38. Weier J. y Herring, D. (2000). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Recuperado el 16/07/15 a las 20:29 de:

<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

39. Weng, Q. y Yang, S. (2006). Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 463 - 489. doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.
40. Xiaolei Y., Xulin G. y Zhaocong W. (2014). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote sensing*, 9829-9852. doi:10.3390/rs6109829
41. Yang, X.y Lo, C. P. (2002). Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (9), 1775–1798.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Mapa de Puntos para el análisis estadístico

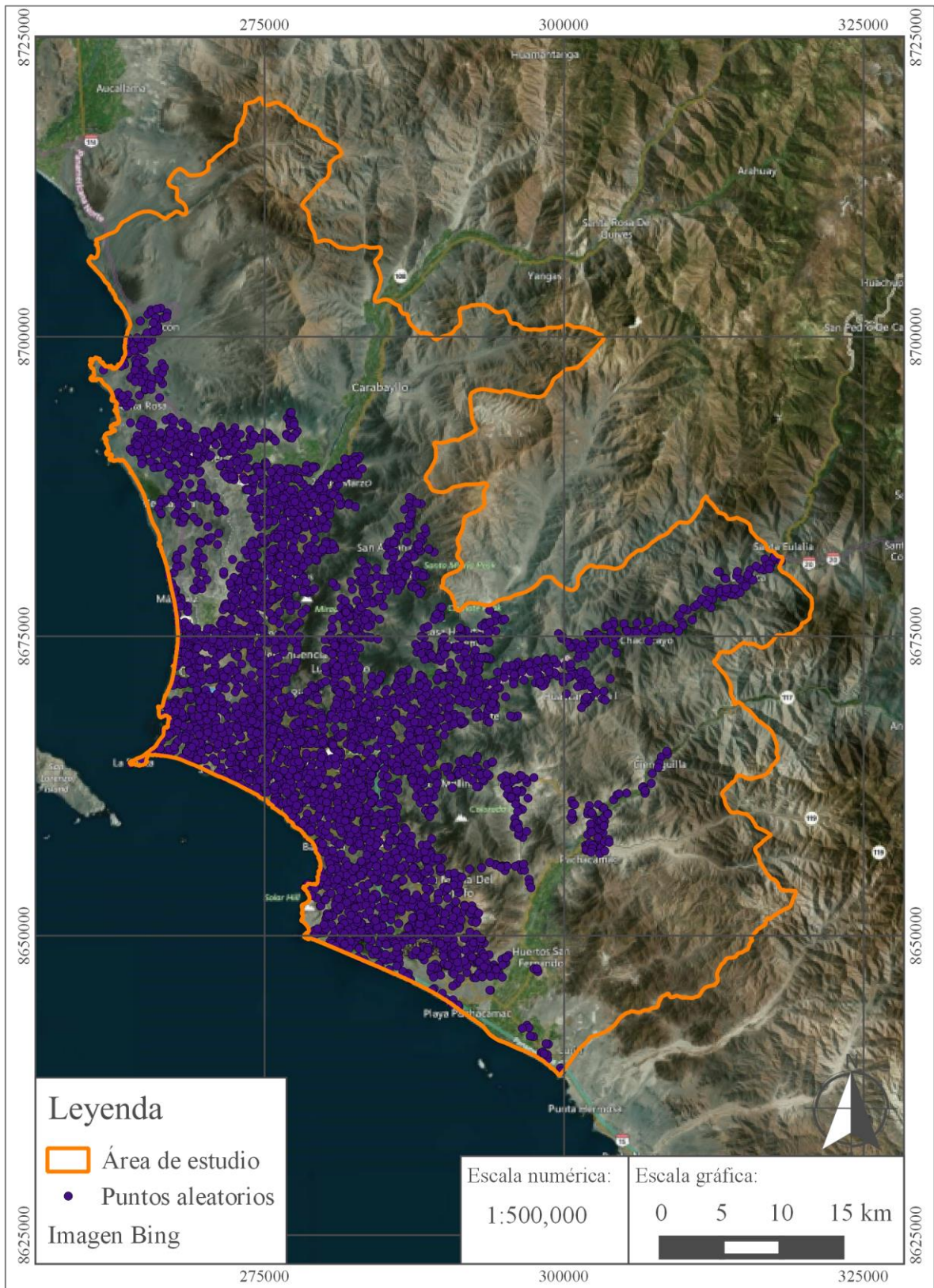


Figura A.1: Puntos aleatorios (muestra) para el análisis estadístico

Elaboración propia, 2016



Figura A.2: Puntos de estaciones de calidad para el análisis estadístico

Elaboración propia, 2016

Anexo 2: Mapas de temperaturas de superficie del suelo

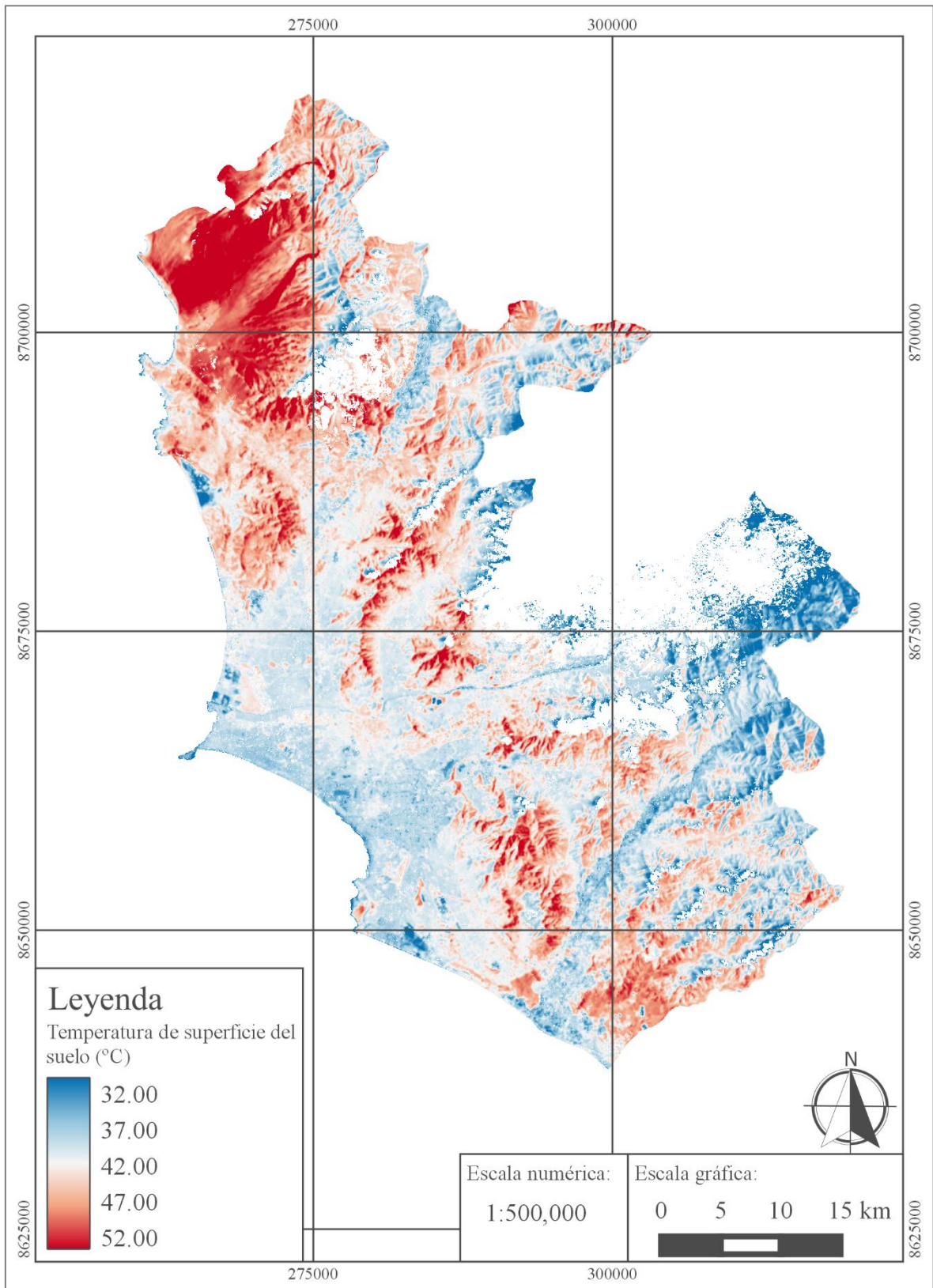


Figura A.3: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13

Elaboración propia, 2016

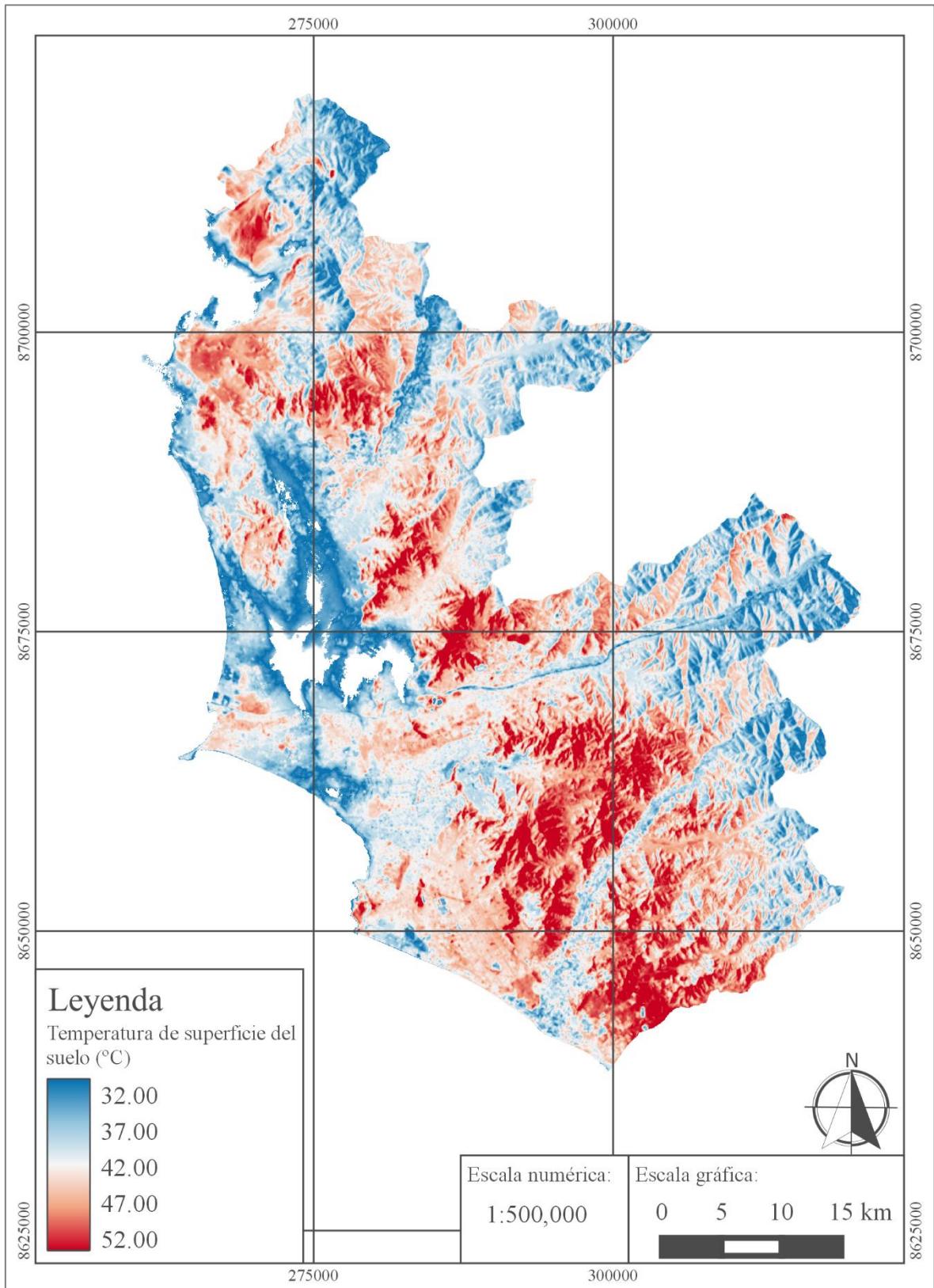


Figura A.4: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14
 Elaboración propia, 2016

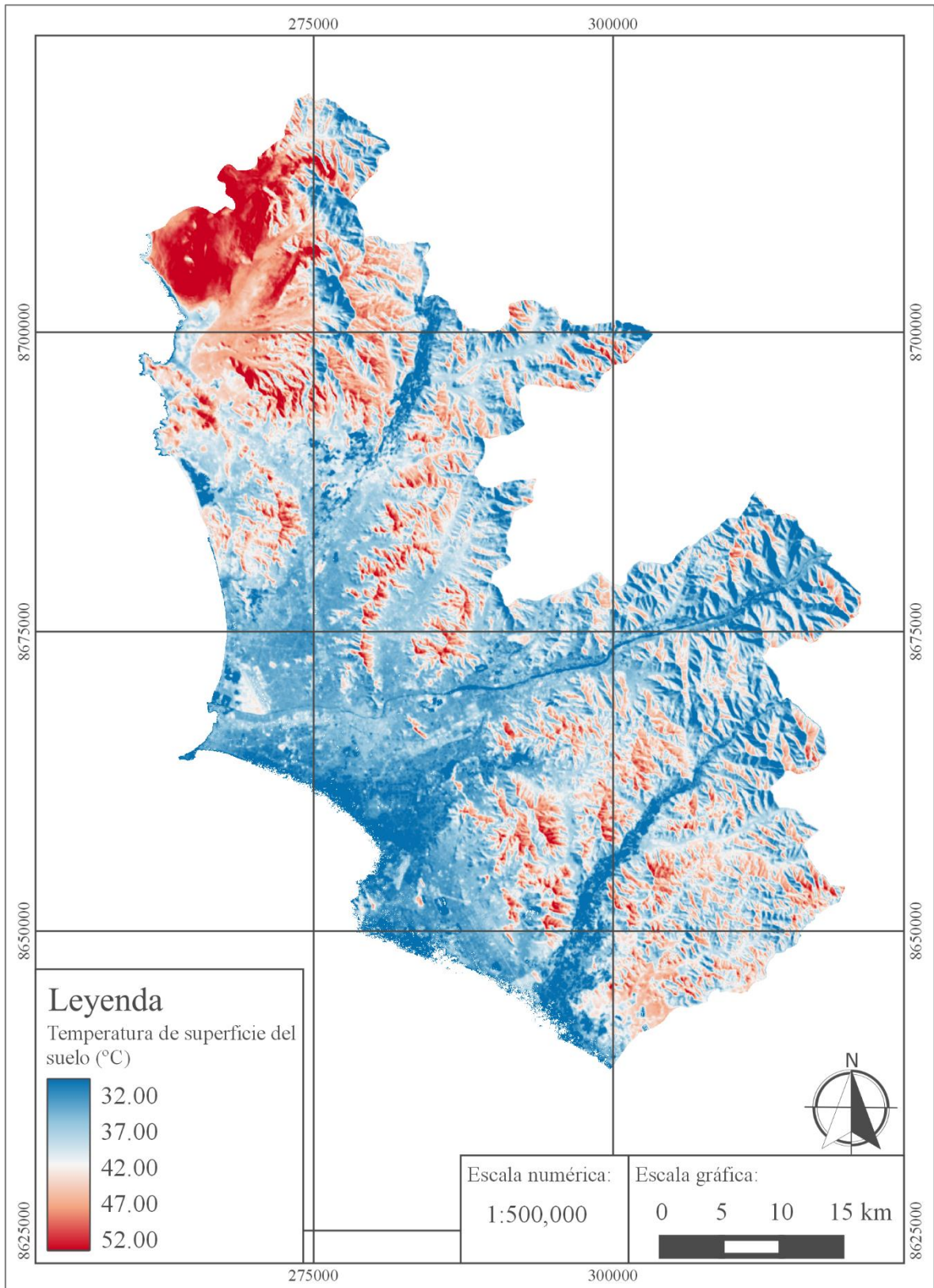


Figura A.5: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14

Elaboración propia, 2016

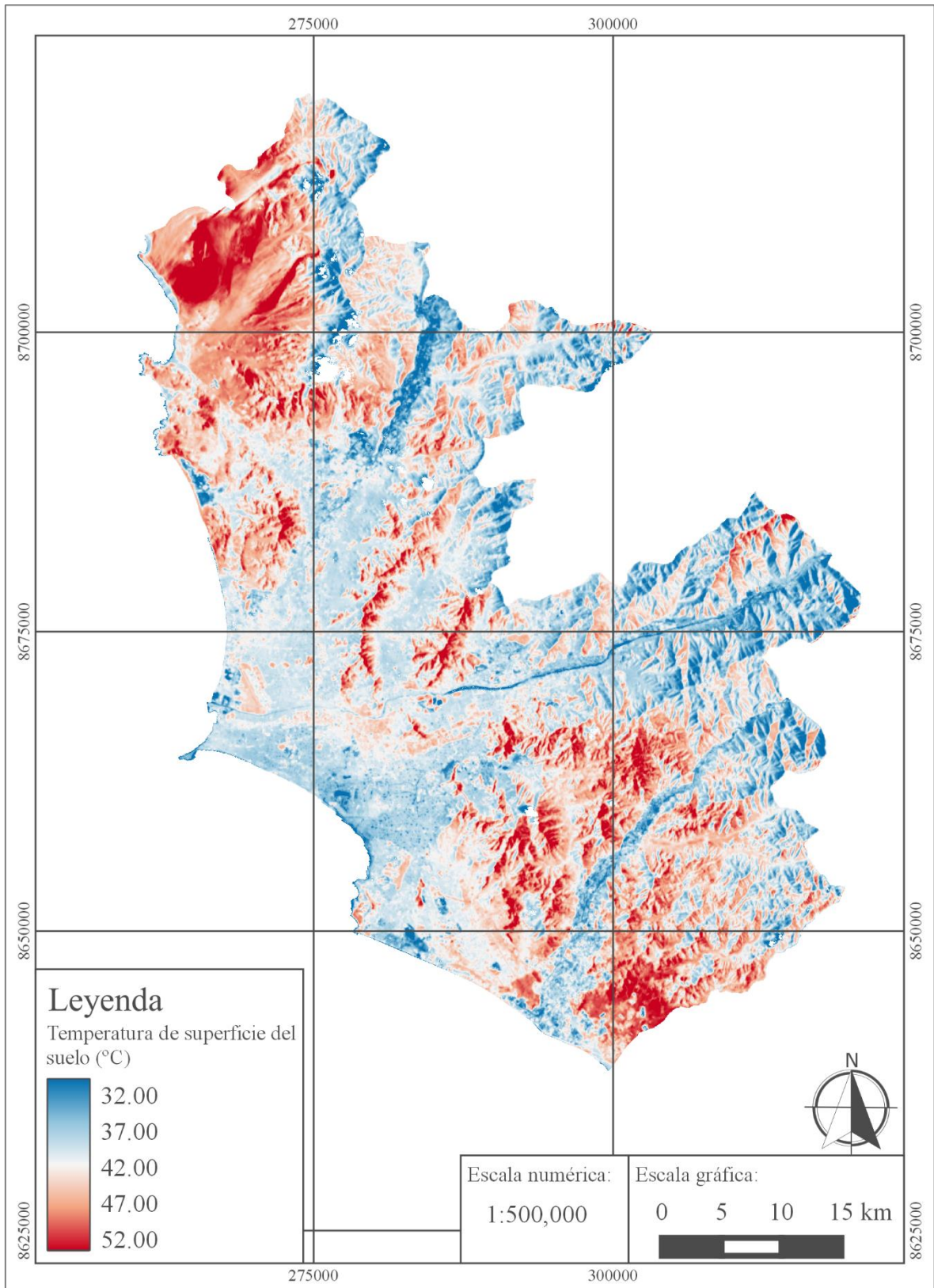


Figura A.6: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15

Elaboración propia, 2016

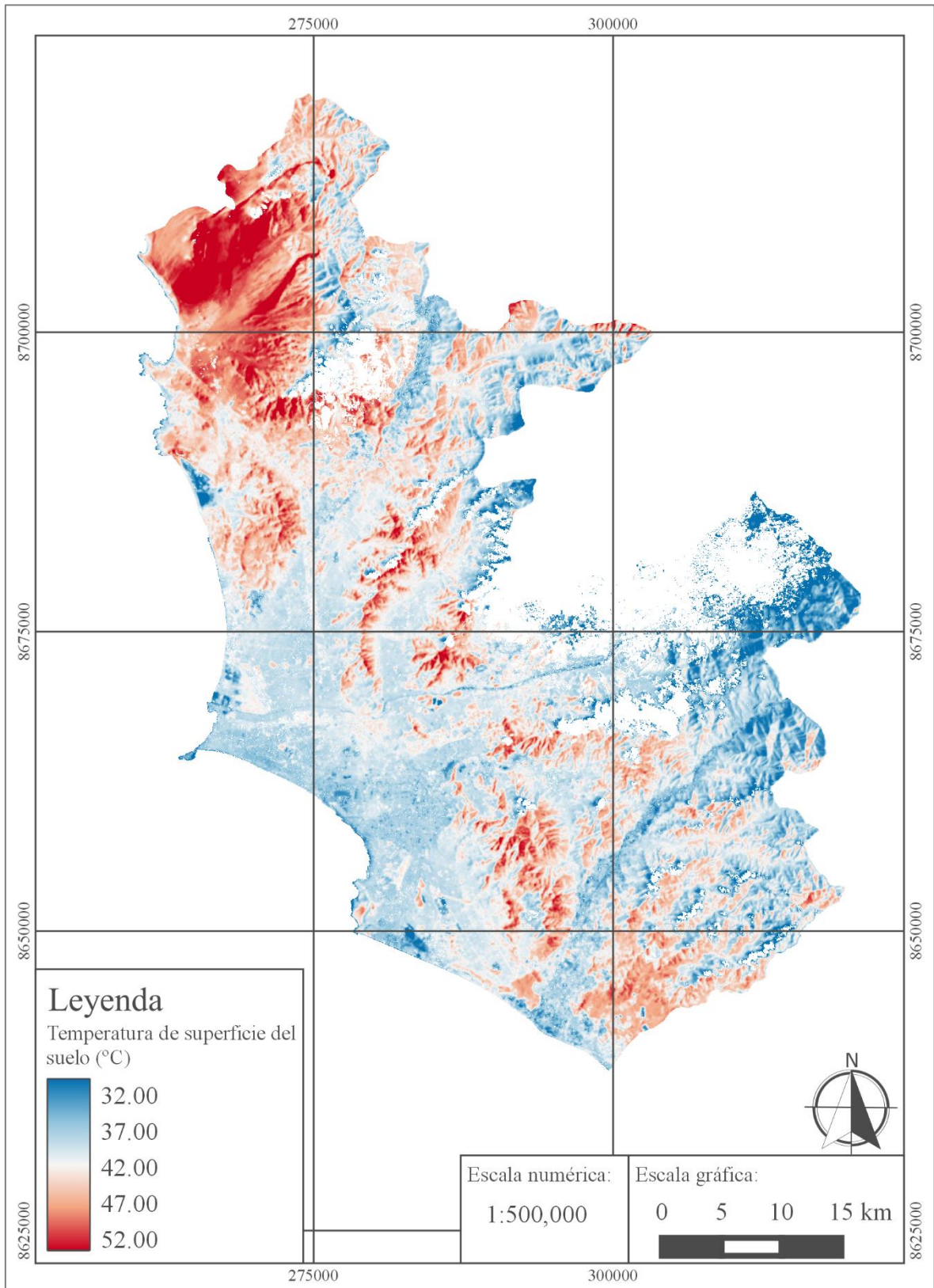


Figura A.7: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Lin para el 25/12/13

Elaboración propia, 2016

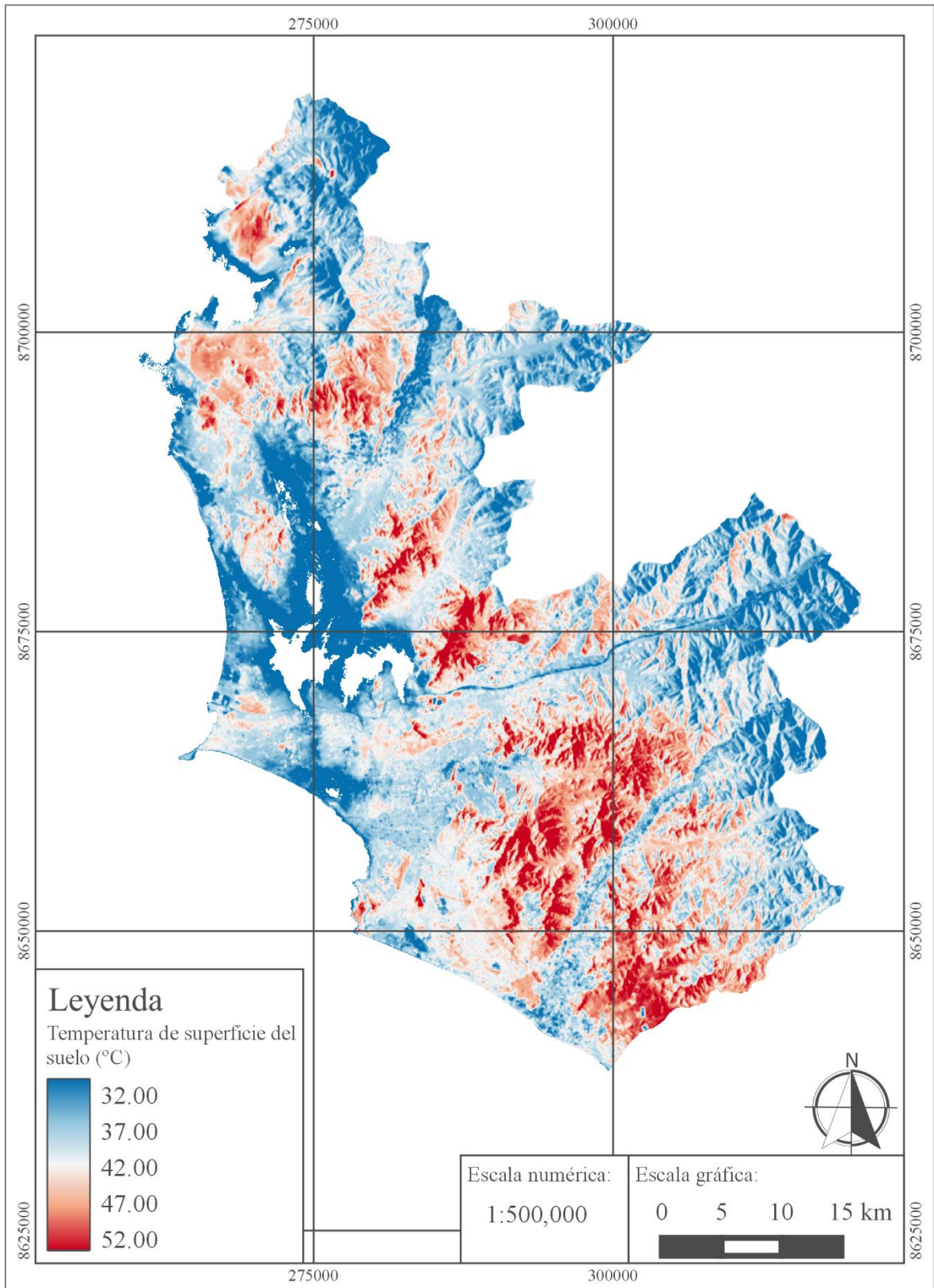


Figura A.8: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Lin para el 11/02/14

Elaboración propia, 2016

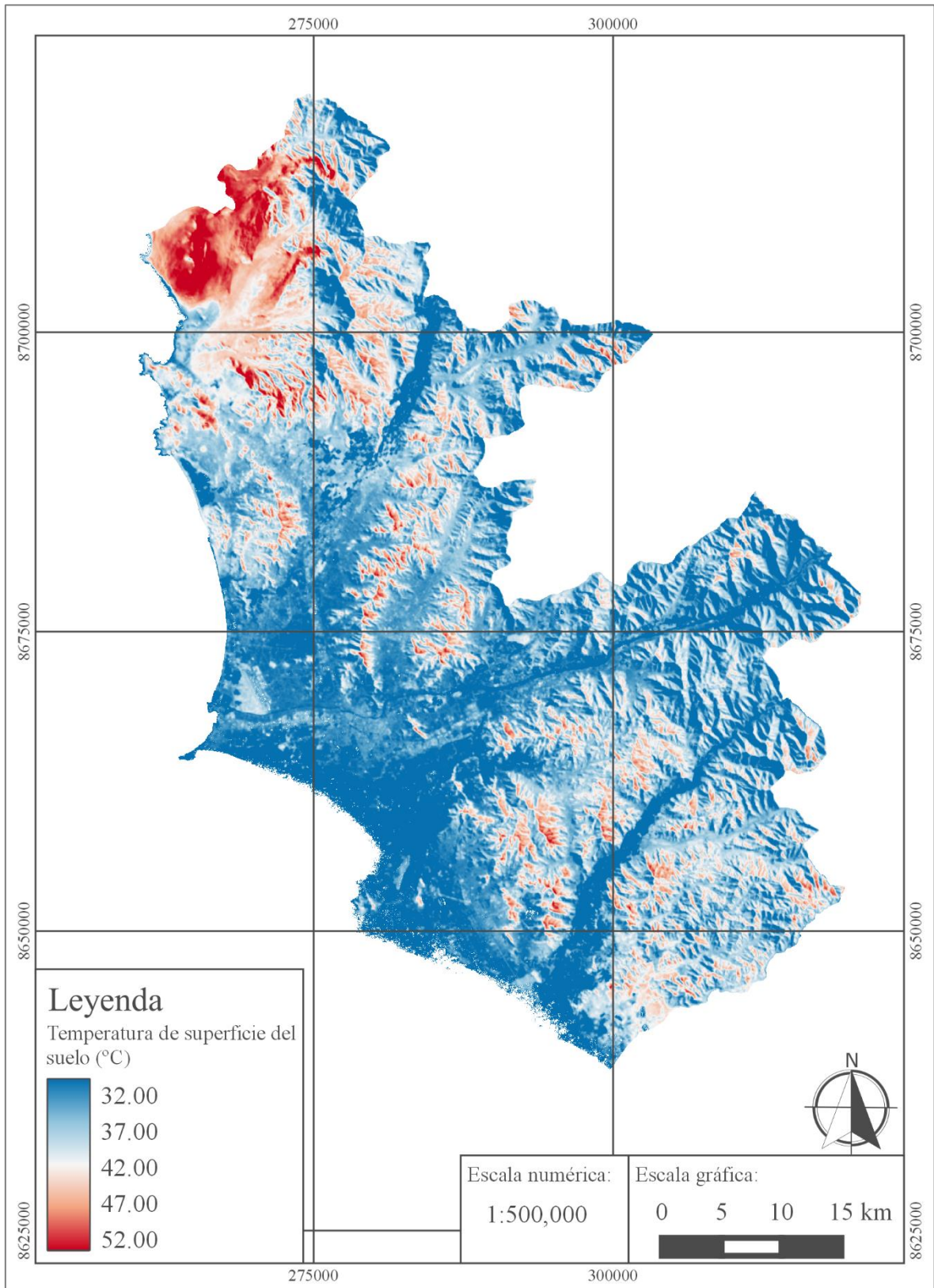


Figura A.9: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Lin para el 16/04/14
 Elaboración propia, 2016

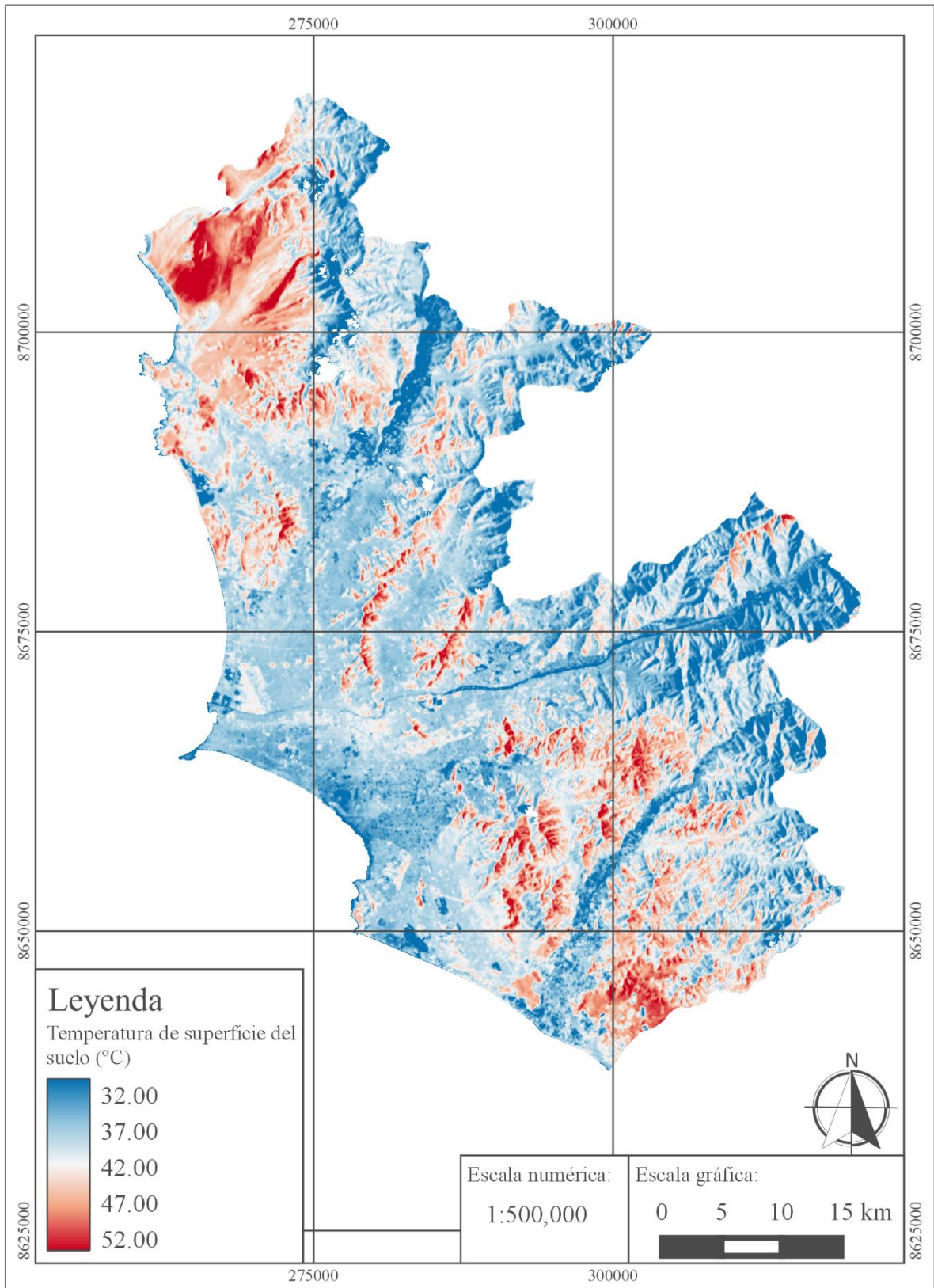


Figura A.10: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SC y la ecuación de vapor de agua Lin para el 29/01/15

Elaboración propia, 2016

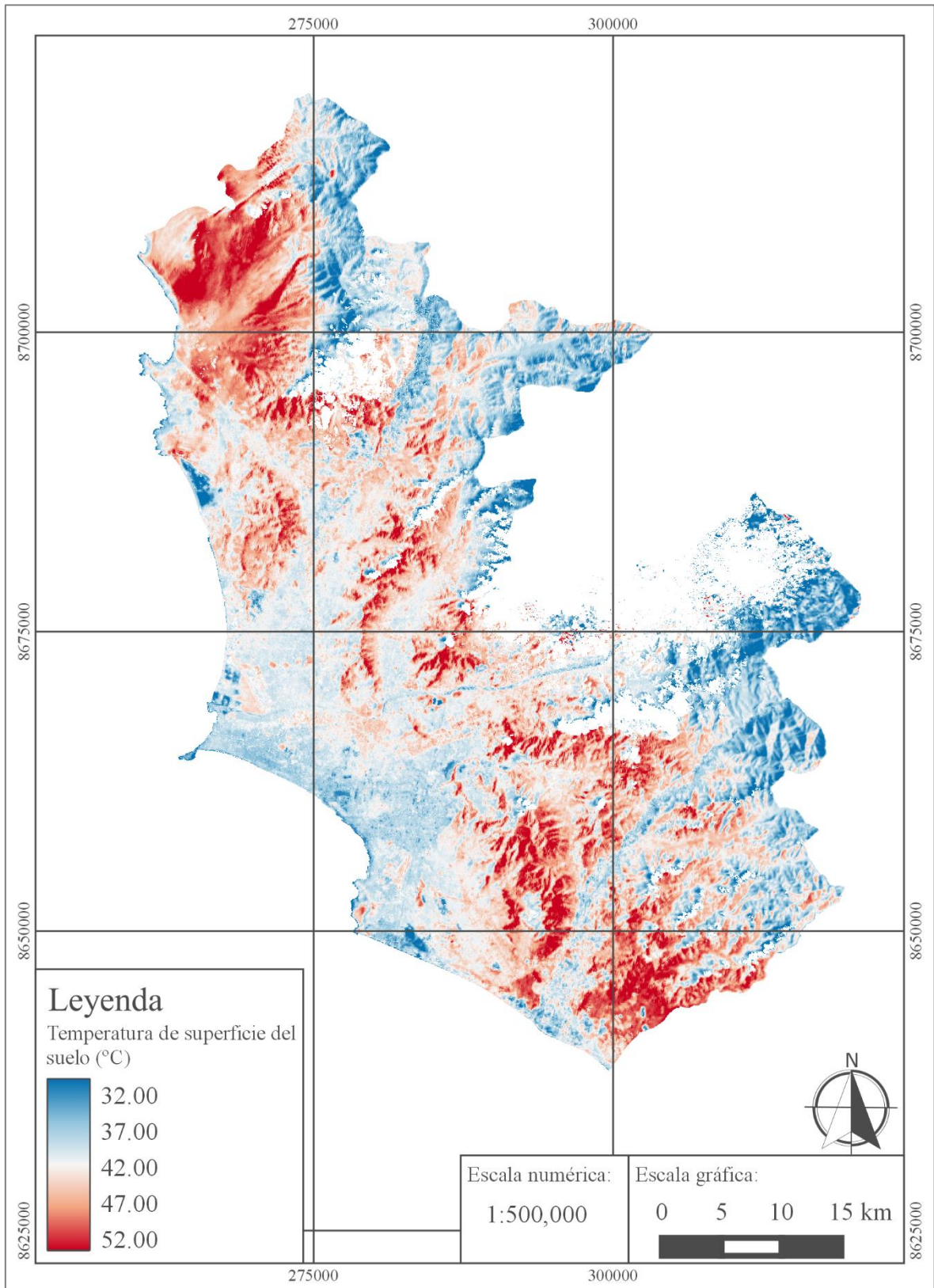


Figura A.11: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 25/12/13

Elaboración propia, 2016

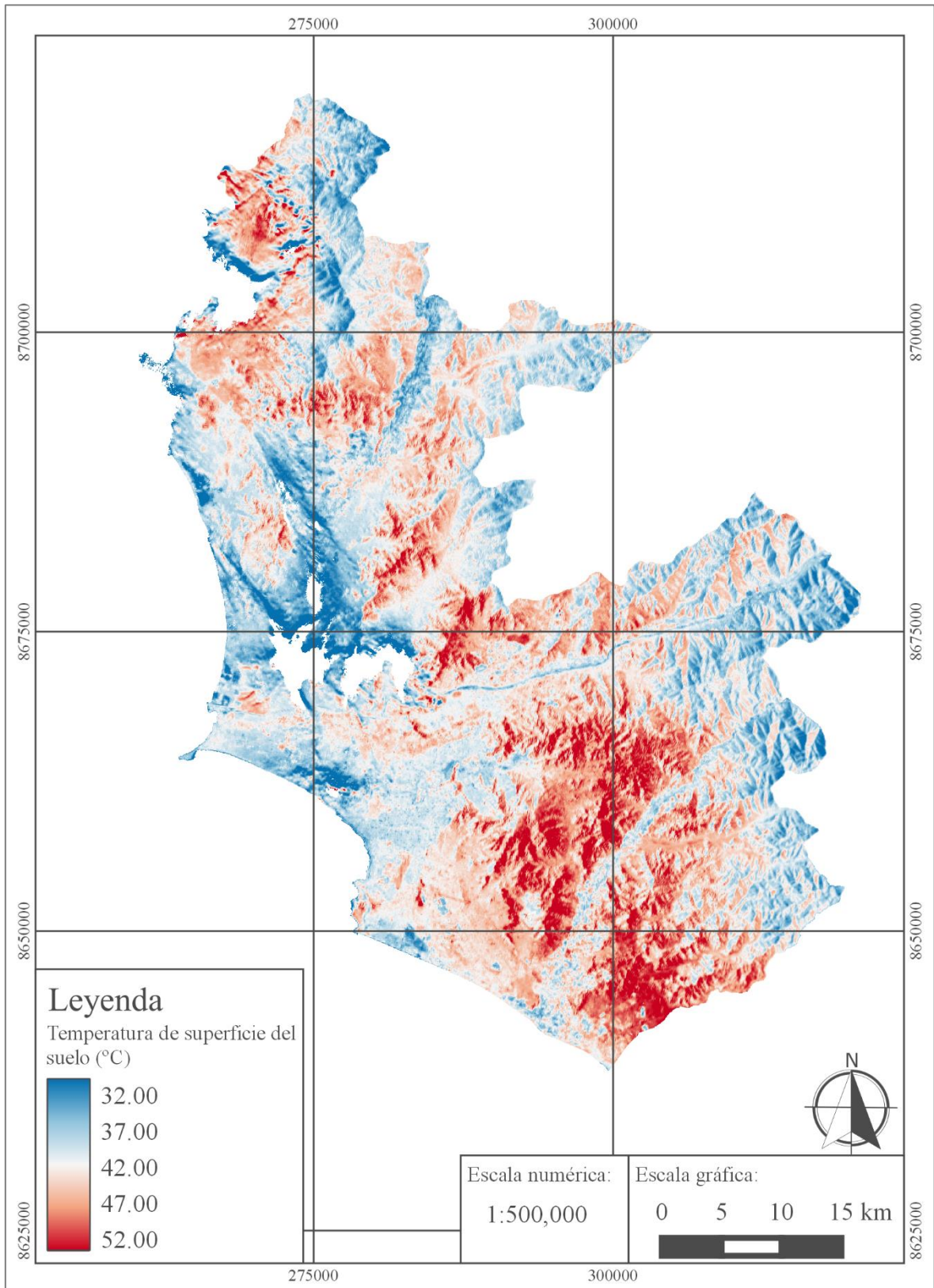


Figura A.12: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 11/02/14

Elaboración propia, 2016

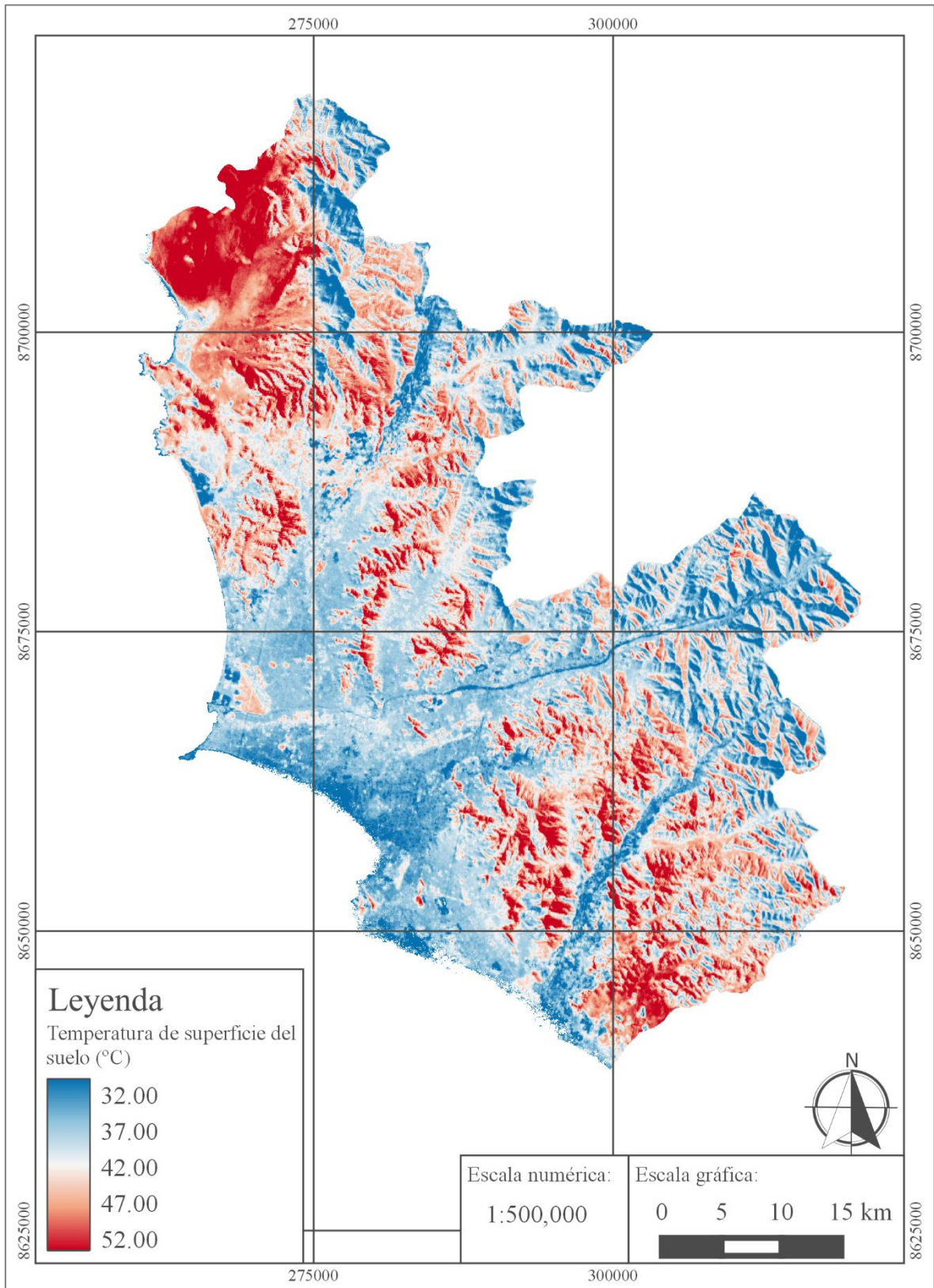


Figura A.13: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 16/04/14

Elaboración propia, 2016

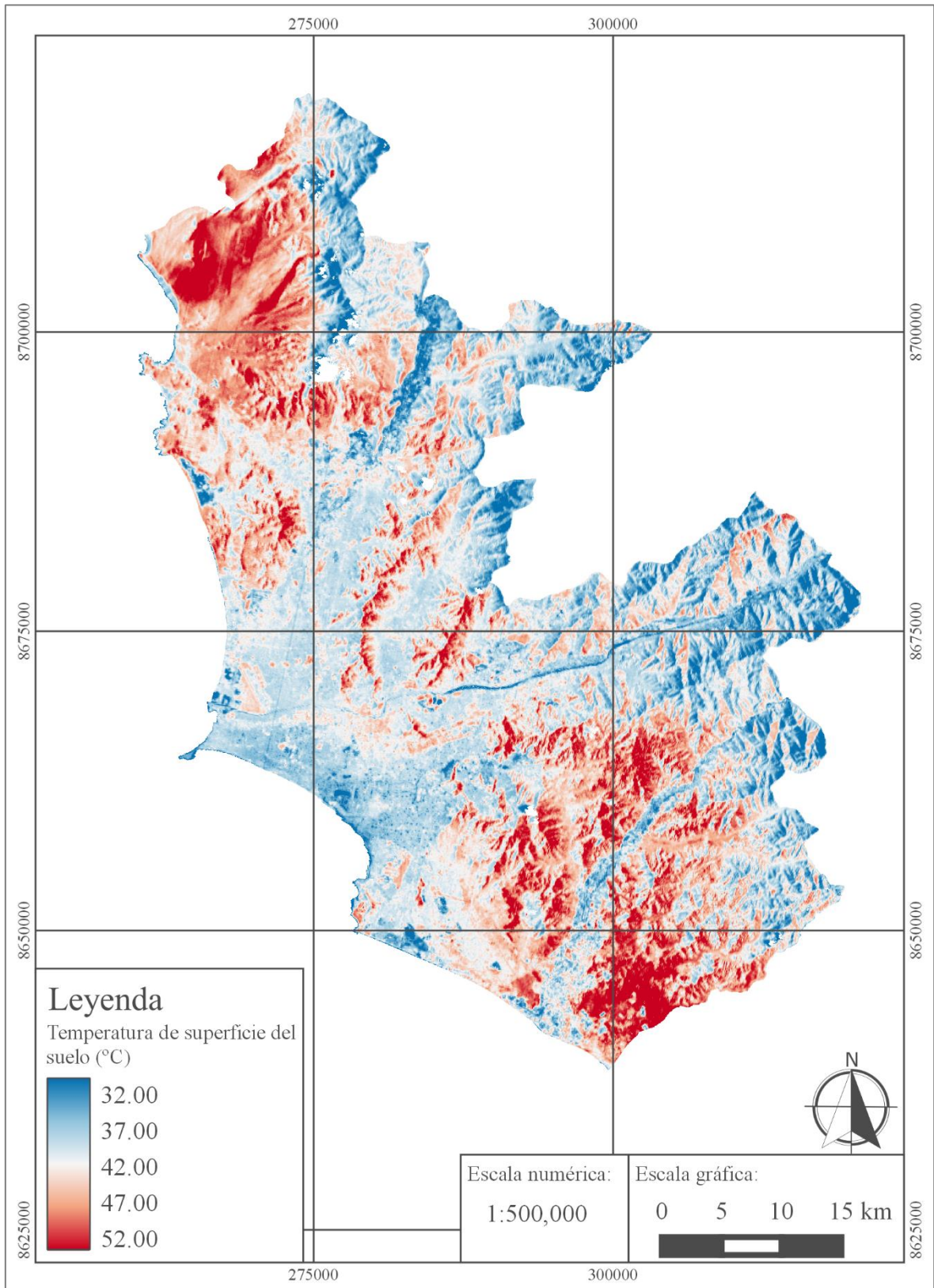


Figura A.14: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Xiaolei para el 29/01/15

Elaboración propia, 2016

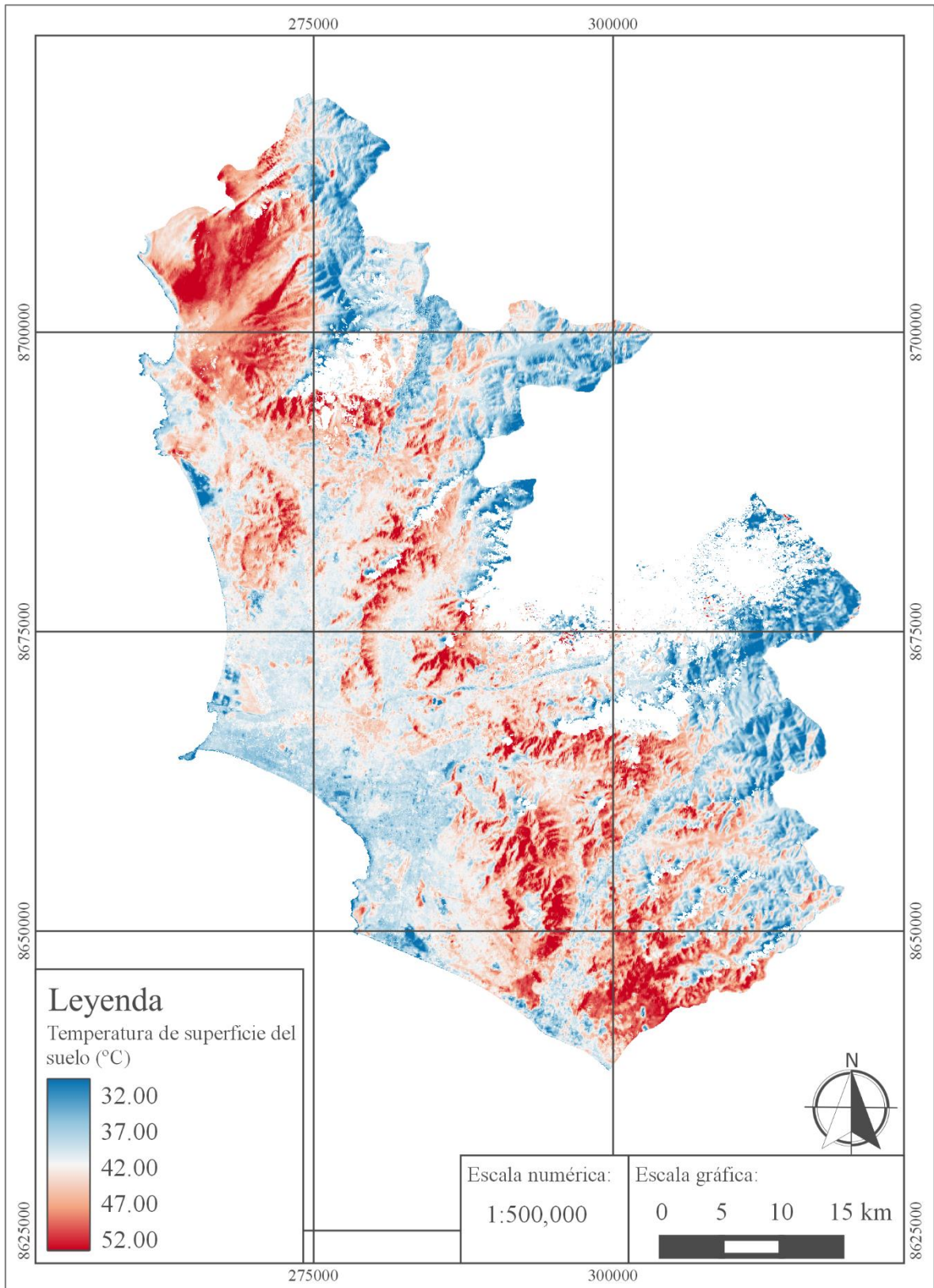


Figura A.15: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Lin para el 25/12/13

Elaboración propia, 2016

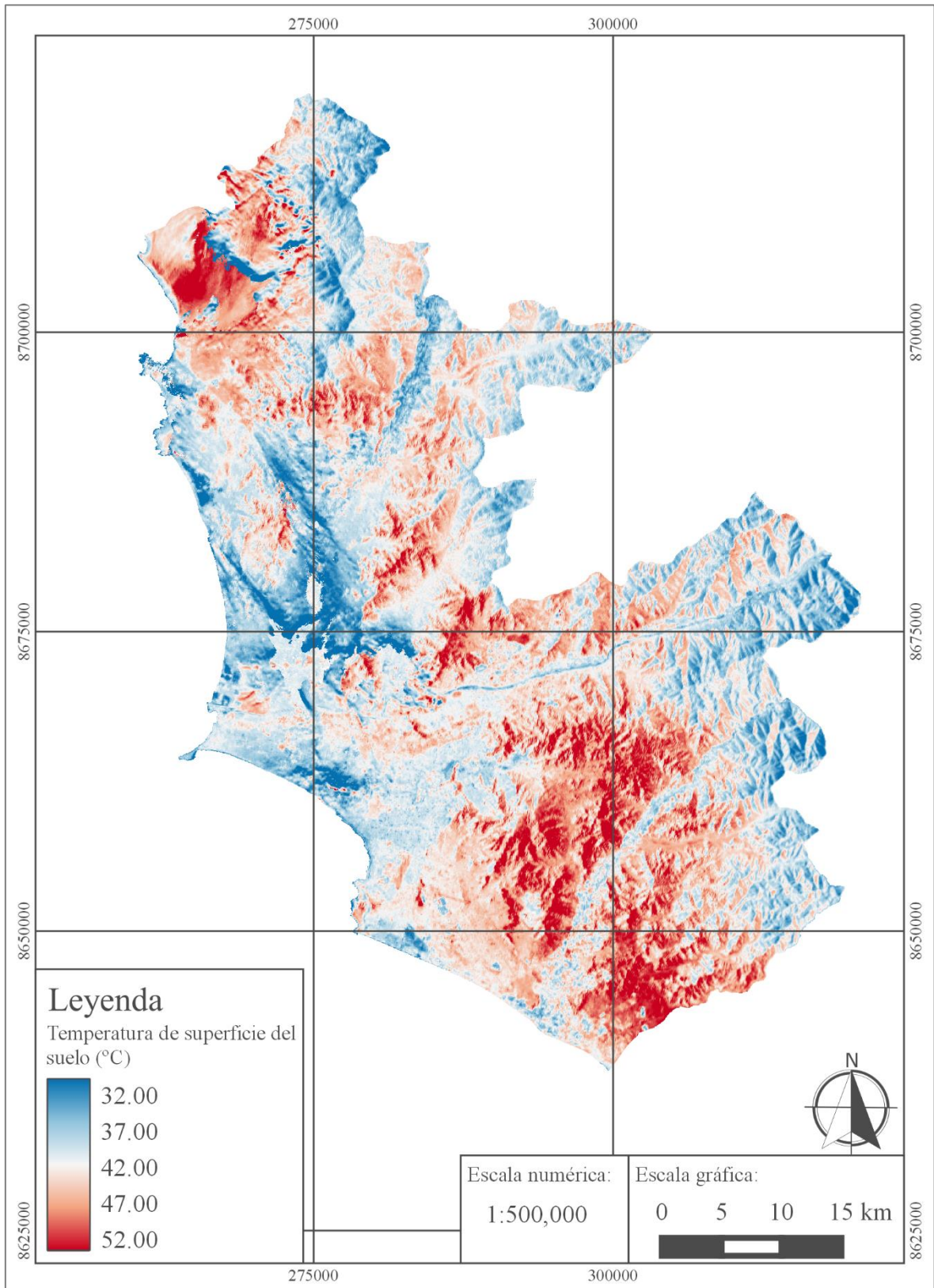


Figura A.16: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Lin para el 11/02/14

Elaboración propia, 2016

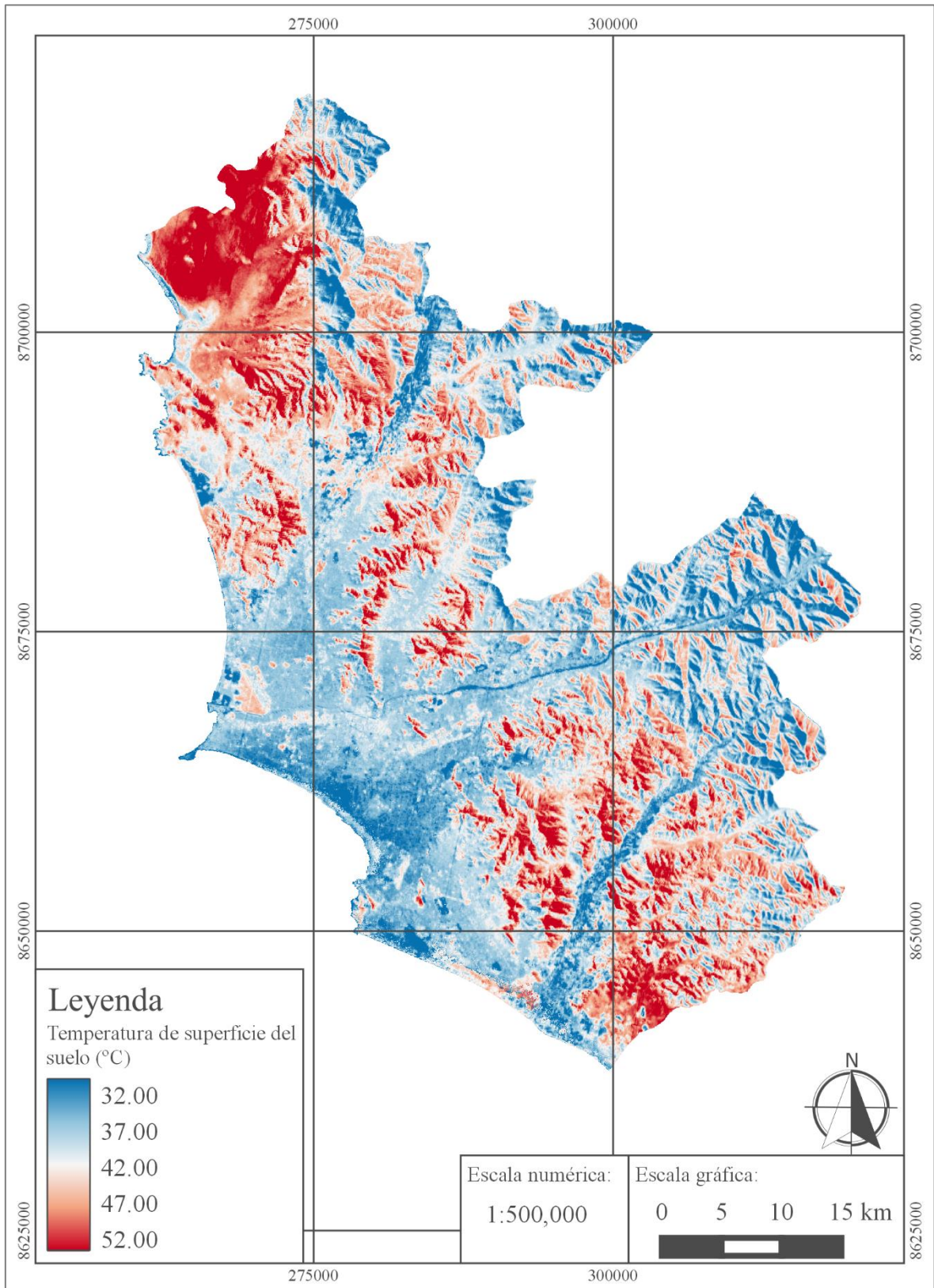


Figura A.17: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Lin para el 16/04/14

Elaboración propia, 2016

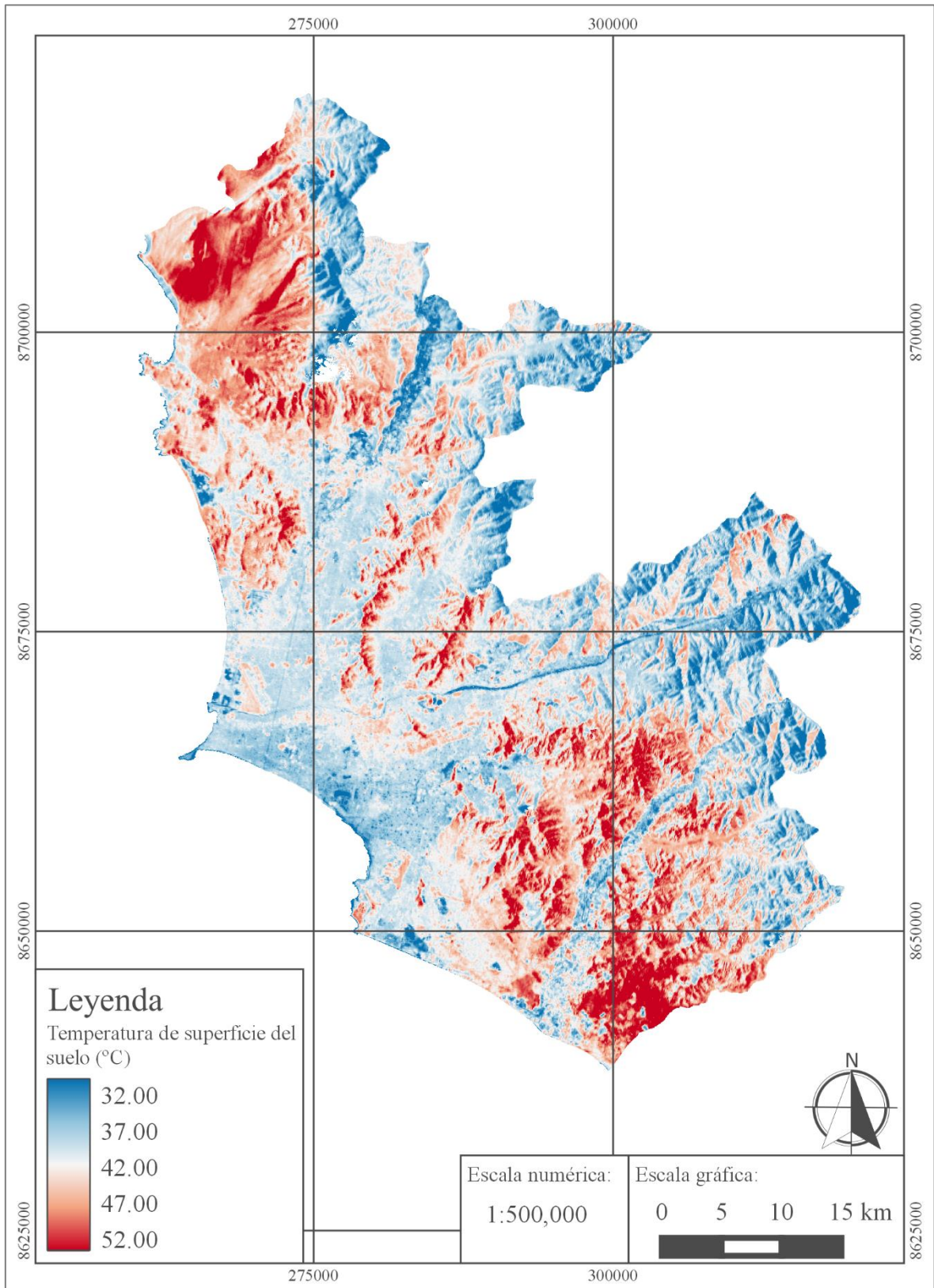


Figura A.18: Temperatura de la Superficie del suelo (°C) hallado por el método SW y la ecuación de vapor de agua Lin para el 29/01/15

Elaboración propia, 2016

Anexo 3: Mapas de NDVI y NDBI

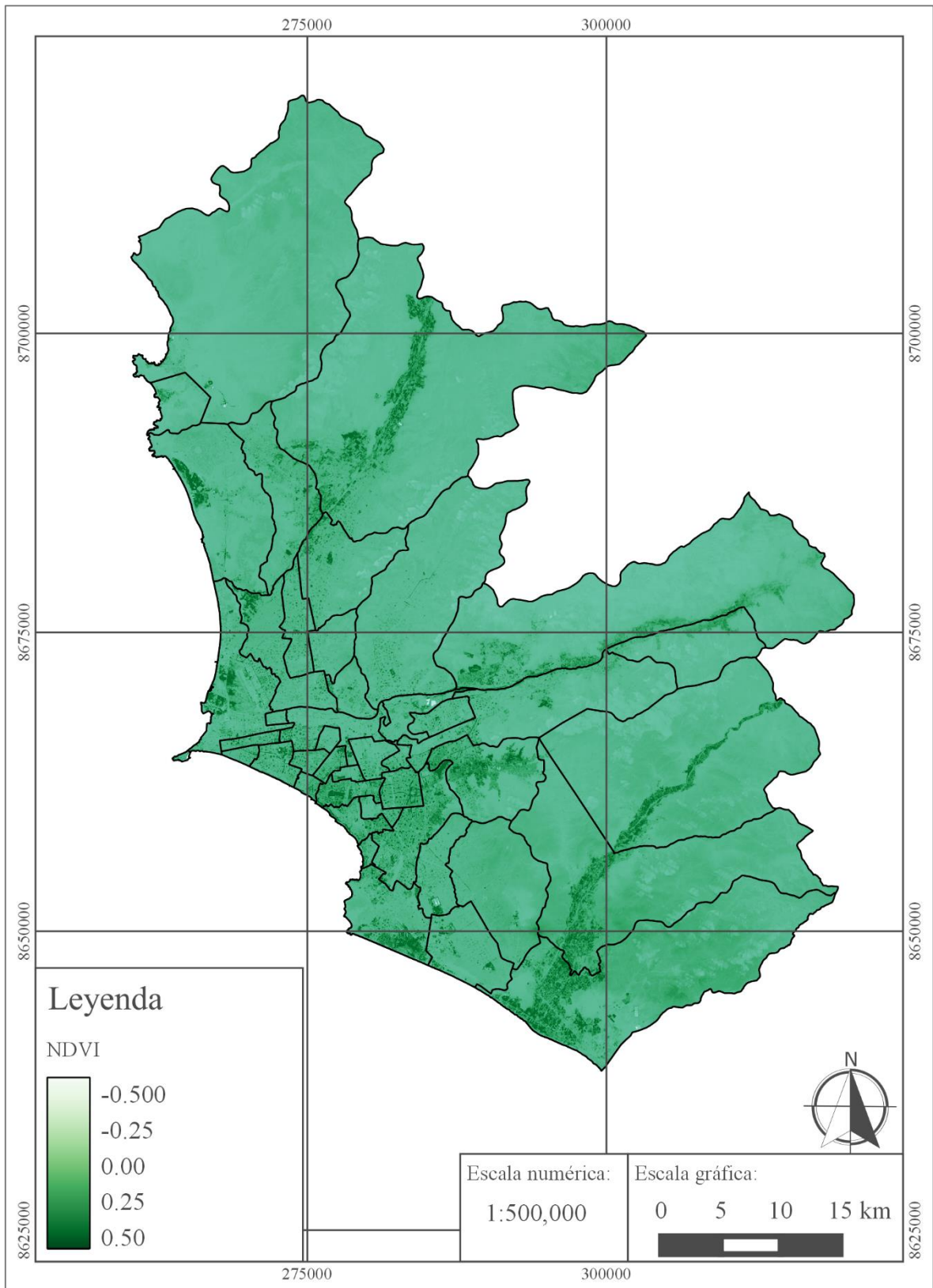


Figura A.19: Valores de Índice de vegetación normalizada (NDVI) el 25/12/2013 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

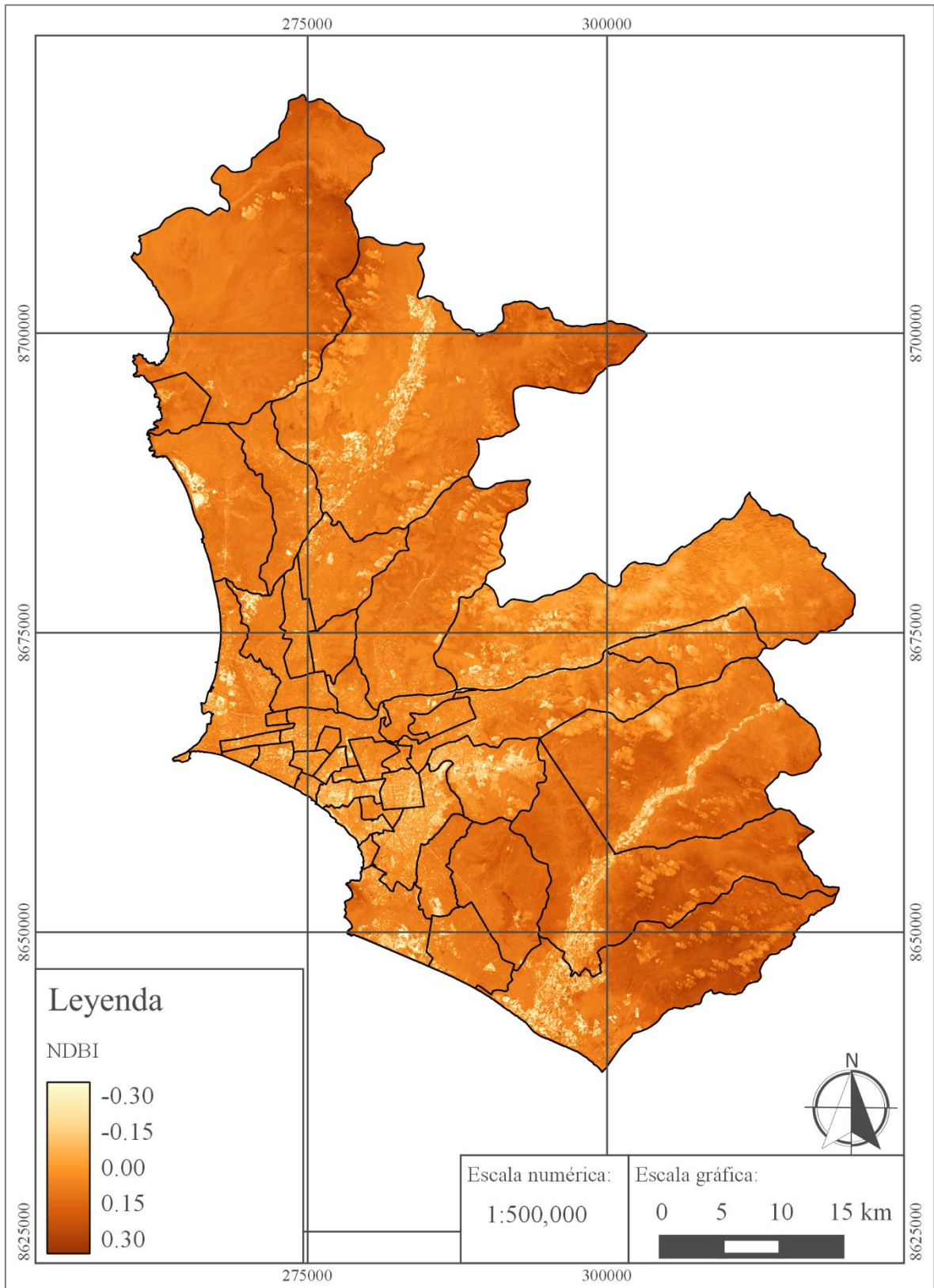


Figura A.20: Valores de Índice de edificación normalizada (NDBI) el 25/12/2013 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

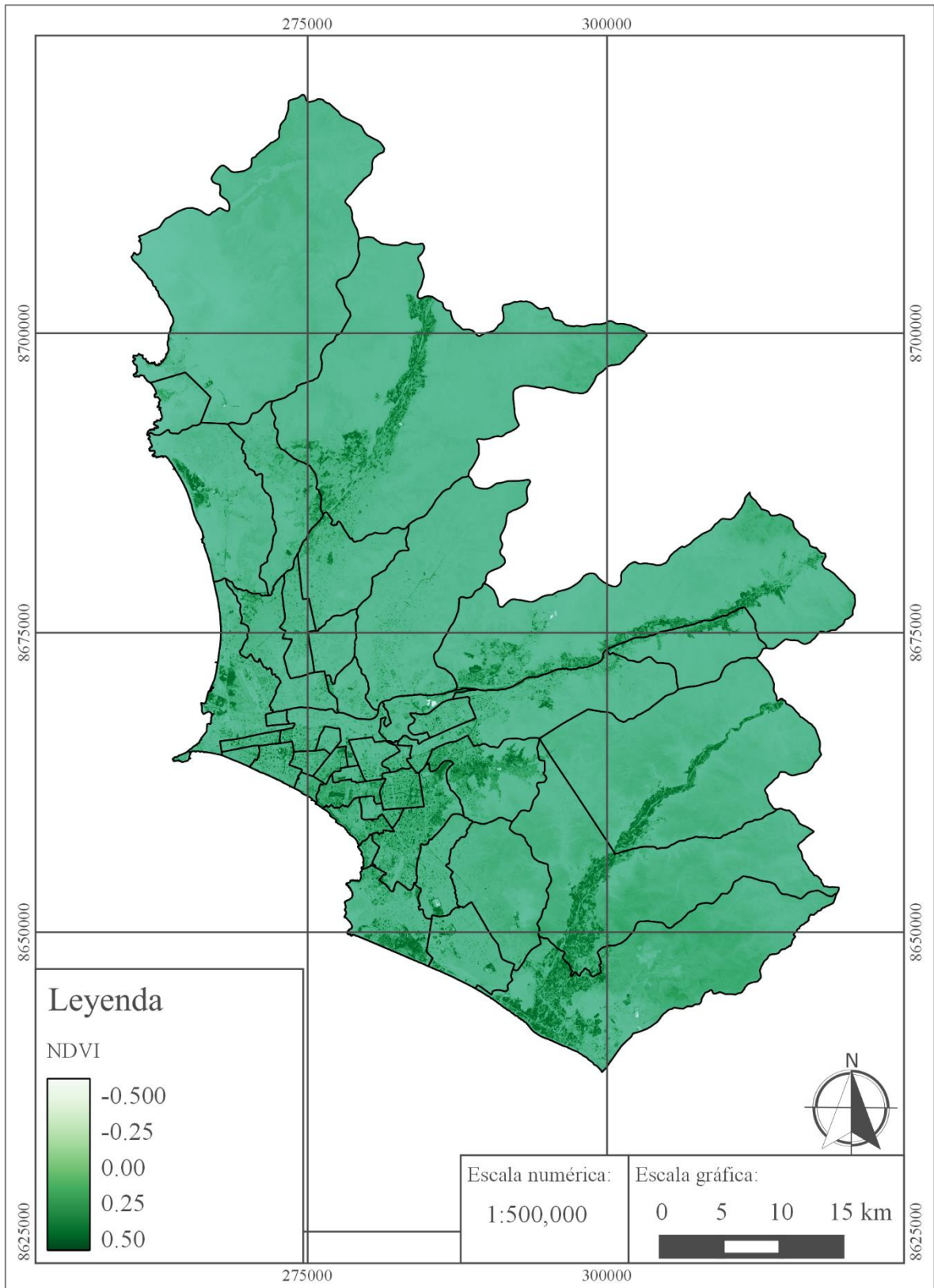


Figura A.21: Valores de Índice de vegetación normalizada (NDVI) el 11/02/14 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

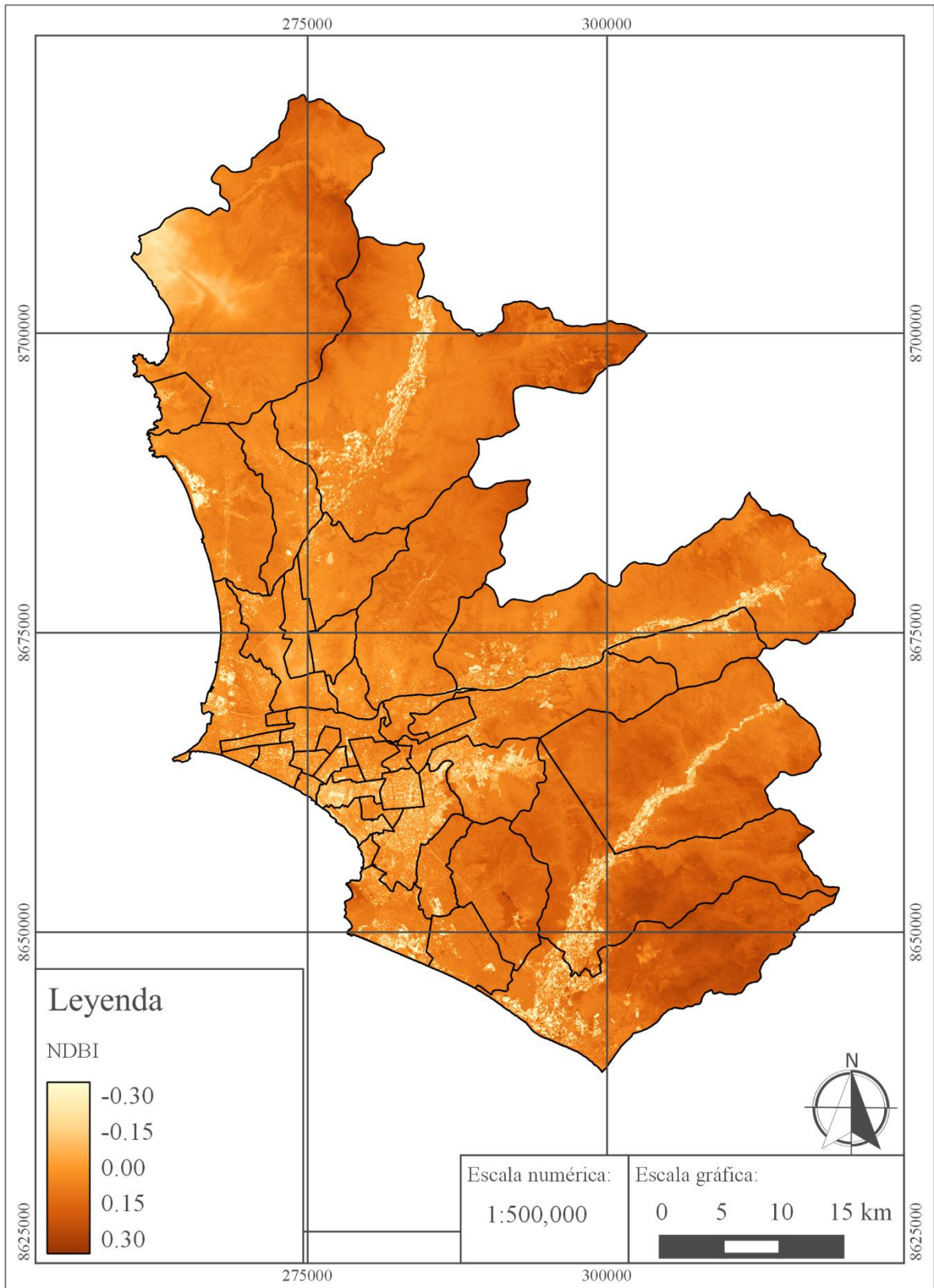


Figura A.22: Valores de Índice de edificación normalizada (NDBI) el 11/02/14 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

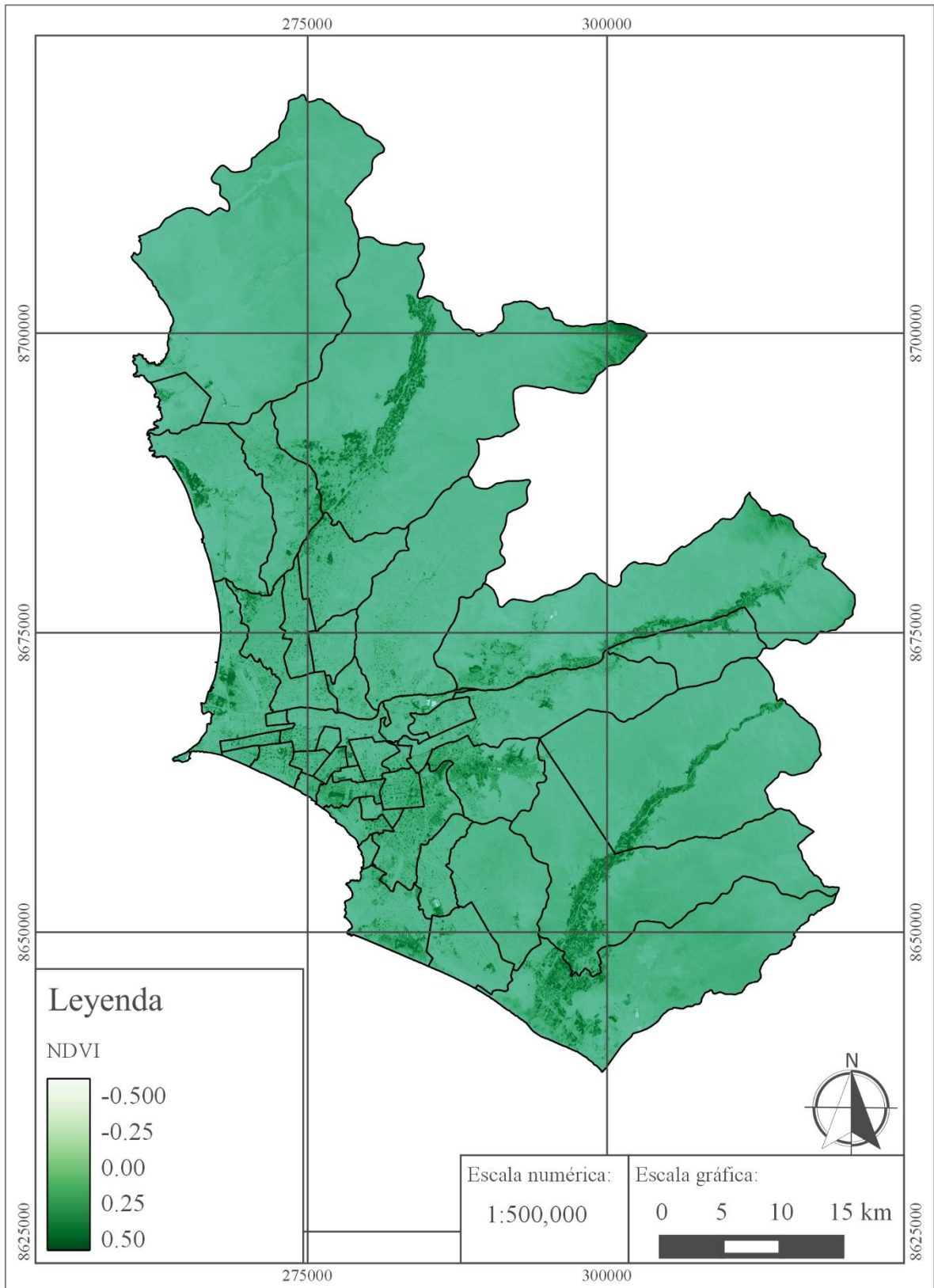


Figura A.23: Valores de Índice de vegetación normalizada (NDVI) el 16/04/14 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

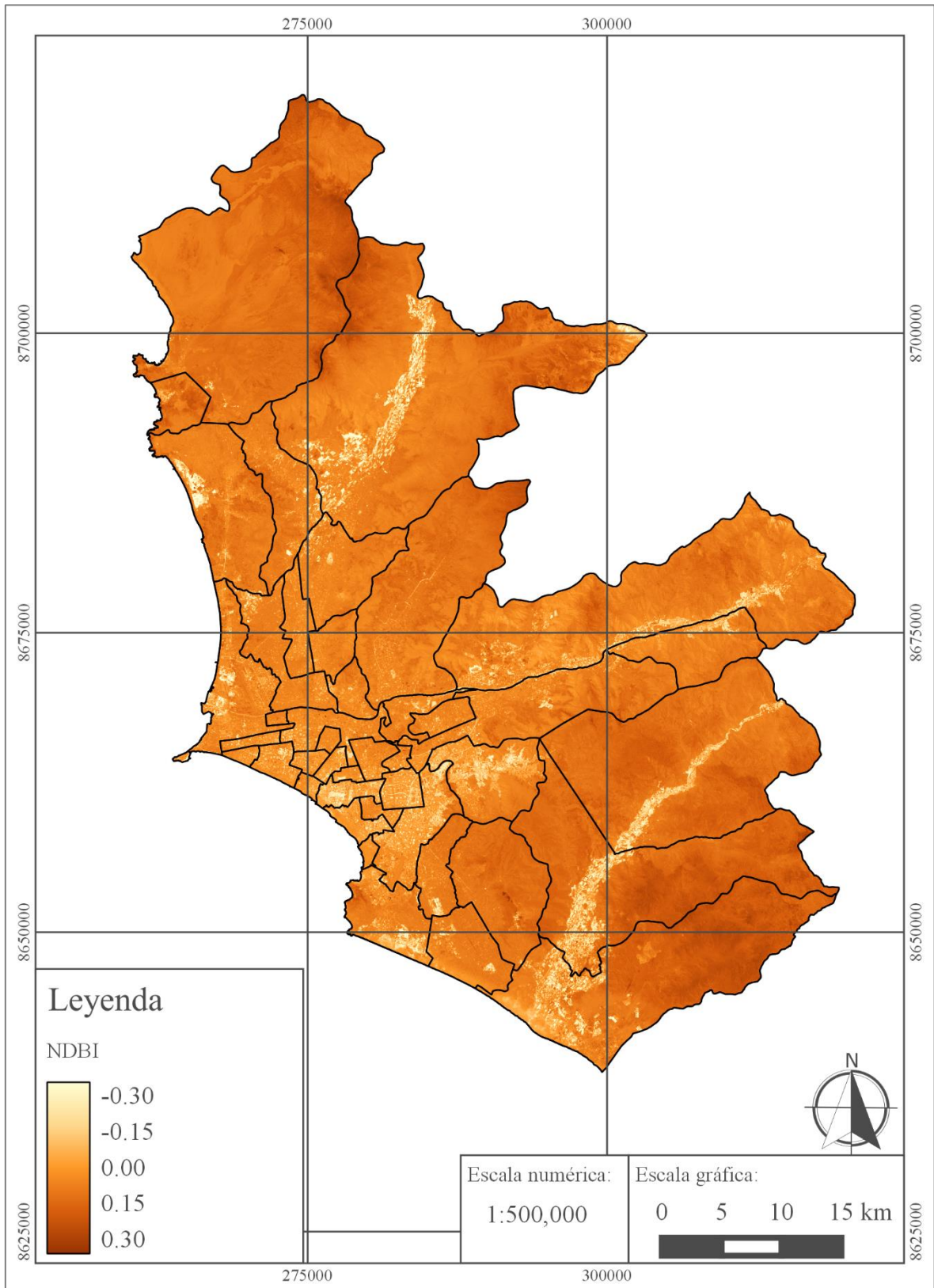


Figura A.24: Valores de Índice de edificación normalizada (NDBI) el 16/04/14 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

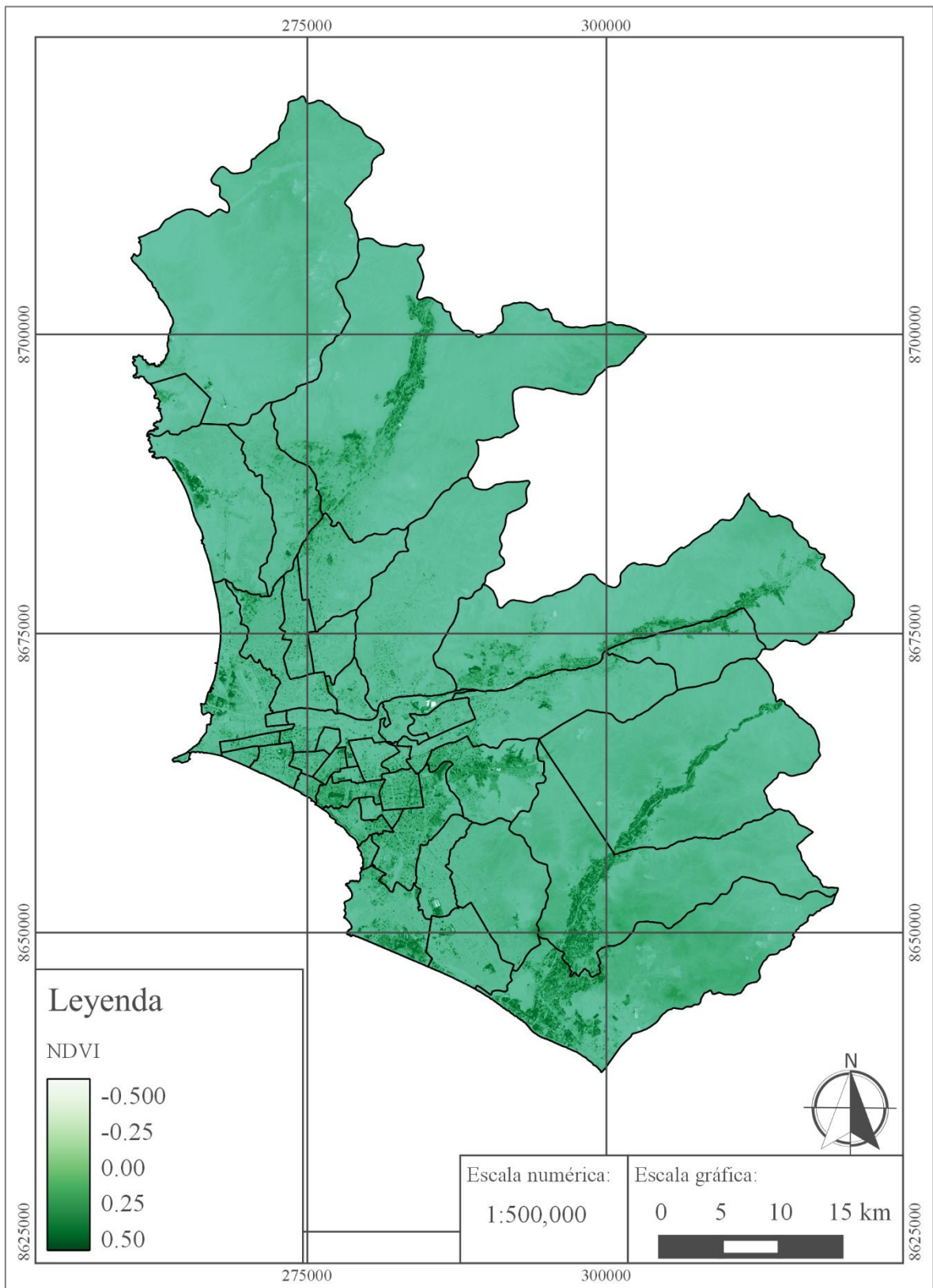


Figura A.25: Valores de Índice de vegetación normalizada (NDVI) el 29/01/15 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

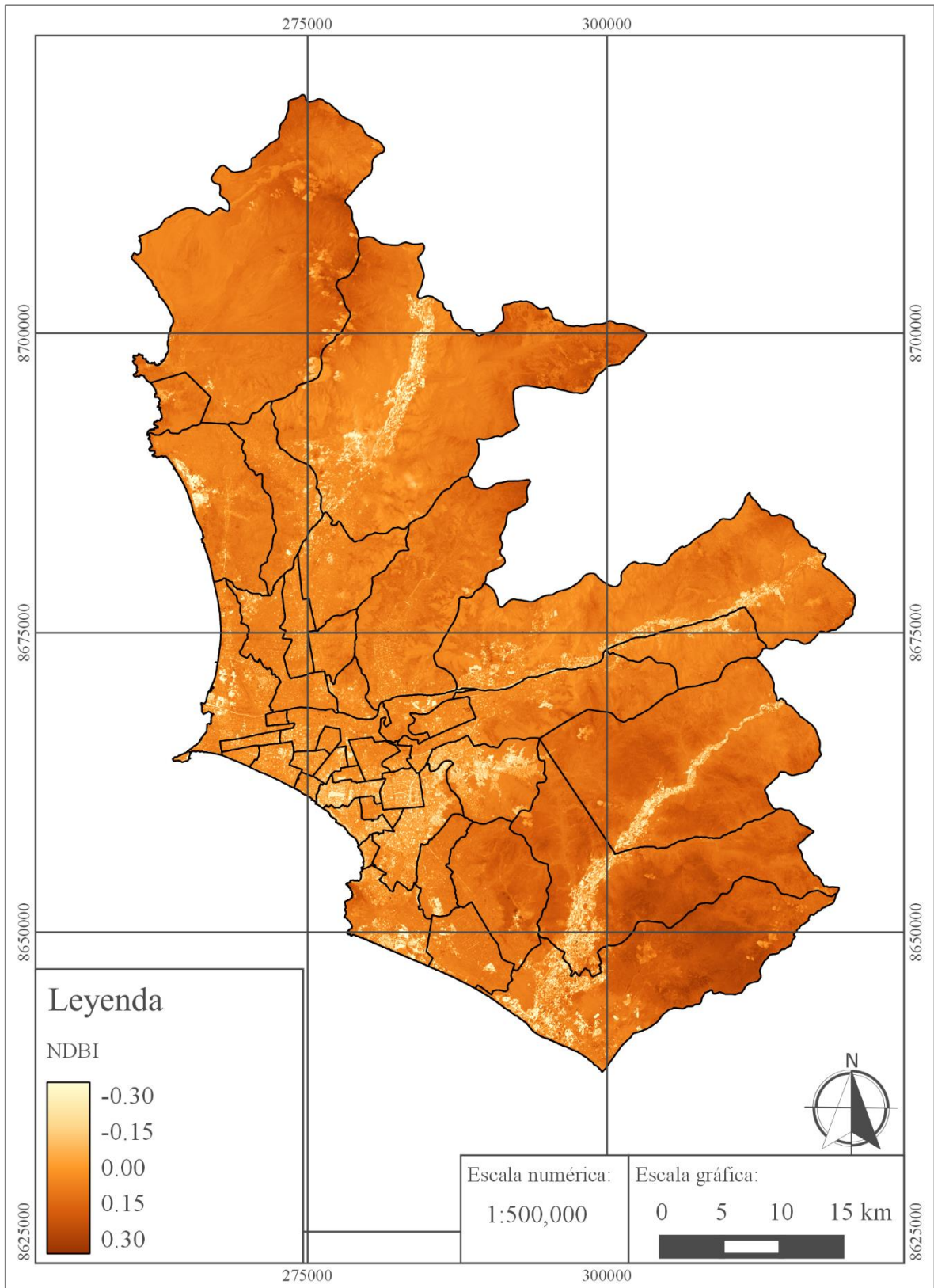


Figura A.26: Valores de Índice de edificación normalizada (NDBI) el 29/01/15 del Área de estudio

Elaboración propia, 2016

Anexo 4: Boxplots de las Temperaturas para la comparación de los métodos

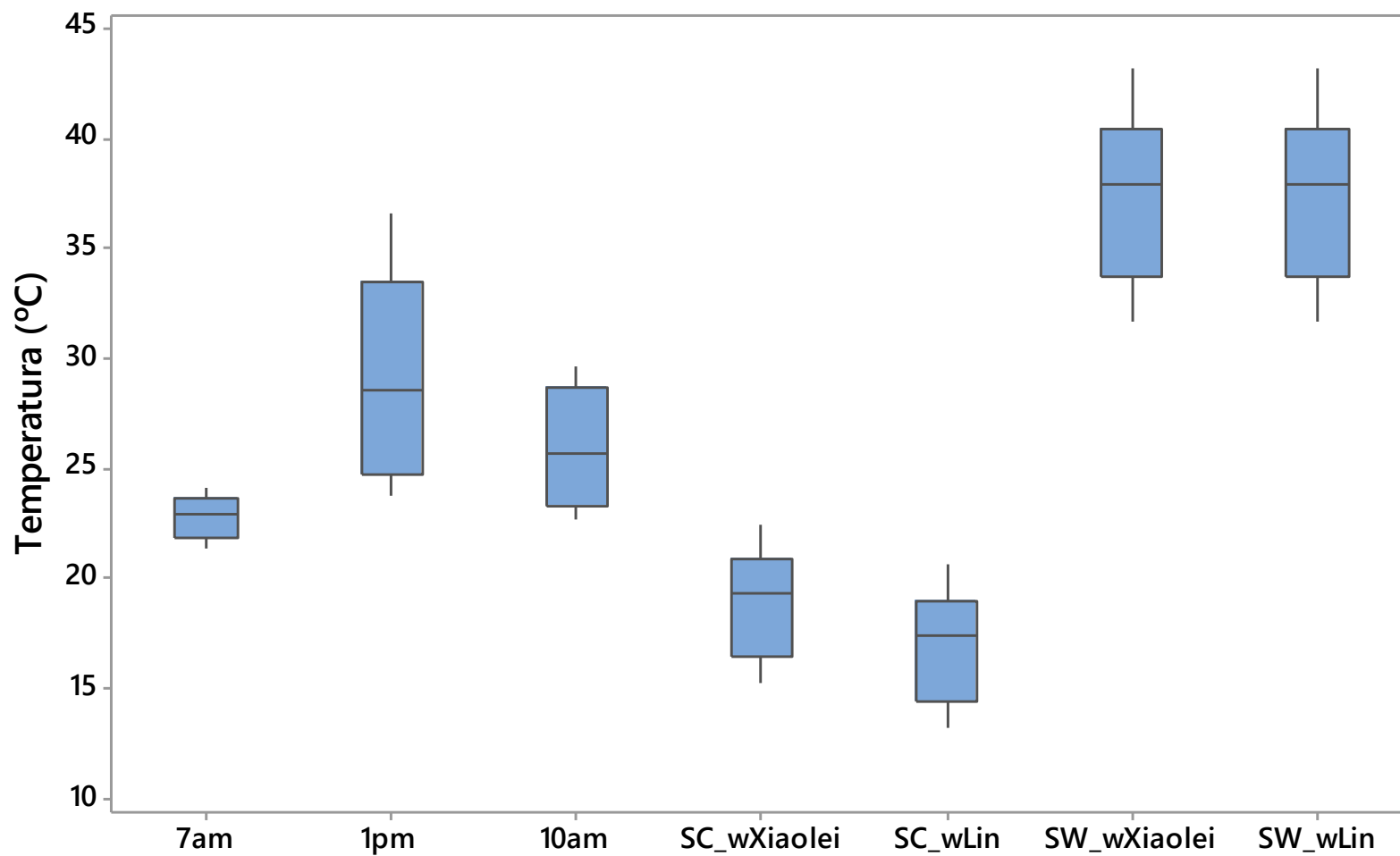


Figura A.27: Diagrama de cajas de Temperaturas de las Temperaturas observadas, interpoladas y calculadas

Elaboración propia, 2016

Anexo 5: Datos recogidos del SENAMHI

Anexo 5.1: Datos recolectados de las estaciones meteorológicas del SENAMHI

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

ESTACION: AGUA AZUL
PARAMETRO: TEMPERATURA DEL AIRE A LAS 10 AM
DPTO.: LIMA
PROV.: LIMA
DIST.: CARABAYLLO

16/04/2014

26.0

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 04 DE ABRIL DEL 2016

OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

Nº PRES/SOLIC: 2016003000155/2016030000081

Ing Manuel Yaverde B. Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION: CAMPO DE MARTE

LONGITUD: 77° 02' "W"

DPTO.: LIMA

PARAMETRO: TEMPERATURA DEL AIRE A LAS 10 AM

LATITUD: 12° 04' "S"

PROV.: LIMA

DIST.: JESUS MARIA

ALT.: 123 mshnm.

25/12/2013	16/04/2014	29/01/2015
24.6	23.7	25.0

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 04 DE ABRIL DEL 2016

Nº PRES/SOLIC: 201603000155 /201603000081

Ing. Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : VILLA MARÍA DEL TRIUNFO

LONG. : 76° 55' "W"

PARAMETRO : TEMPERATURA DEL AIRE A LAS 10 AM

DPTO. : LIMA

PROV. : LIMA

DIST. : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

25/12/2013	16/04/2014	29/01/2015
23.8	21.9	26.0

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 04 DE ABRIL DEL 2016

N° PRESOLIC: 201603000155 / 2016030000081

[Signature]

Jng Manuel Valverde B

Director de la Oficina de Servicio al Cliente

SENAMHI

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION METEOROLÓGICA: VON HUMBOLDT

LONGITUD: 76° 56' "W" y LATITUD: 12° 04' "S"

PARAMETRO: TEMPERATURA DEL AIRE A LAS 10 AM

ALT.: 246 msnm.

DPTO.: LIMA

PROV.: LIMA

DIST.: LA MOLINA

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
------------	------------	------------	------------

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 04 DE ABRIL DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000155 / 201603000081

1616

Ing. Manuel Valverde B.

Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

Anexo 5.2: Datos recolectados de las estaciones de contaminantes atmosféricos del SENAMHI

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

ESTACION TIPO: EMA ANTONIO RAIMONDI
PARAMETRO: TEMPERATURA DEL AIRE A LAS 10 AM

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
23.6	23.3	20.5	24.7

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 04 DE ABRIL DEL 2016

PRE-SOLIC: 201603000185/201603000081

Director de la Oficina de Servicio al Cliente
SENAMHI

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN
TOTAL O PARCIAL





OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : CAMPO DE MARTE

PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. : 77° 02' "W"

LAT. : 12° 04' "S"

ALT. : 159 msnm.

DPTO. : LIMA

PROV. : LIMA

DIST. : JESUS MARIA

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
17.5	77.5	74.1	59.7

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000008 1450

(Signature)
 Ing Manuel Valverde B.
 Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

ESTACION : CAMPO DE MARTE
PARAMETRO : NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. : 77° 02' "W"
LAT. : 12° 04' "S"

DPTO. : LIMA
PROV. : LIMA
DIST. : JESUS MARIA

24/12/2013	11/02/2014
4.8	7.7

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA
LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

Ing Manuel Valverde B
 Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL





OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

ESTACION JUSTI : CAMPO DE MARTE

PARAMETRO : O3 (µg/m³) a las 10 AM

LONG. DE : 77° 02' "W"

LAT. : 12° 04' "S"

ALT. A DEL : 159 msnm.

DPTO. : LIMA

PROV. : LIMA

DIST. RC. : JESUS MARIA

11/02/2014

2.8

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRESISOLIC: 201603000098 /201603000068

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCION
TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMATICA

ESTACION : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

PARAMETRO : NO2 (µg/m³) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 55' "W"

LAT. DEL : 12° 09' "S"

ALT. AL DEL : 292 msnm

DPTO. : LIMA

PROV. : LIMA

DIST. : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

25/12/2013 10.3

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068

Ing Manuel Valverde B. Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : ATE

PARAMETRO : NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 55' "W"

LAT. AL DEL : 12° 1' "S"

ALT. AL DEL : 362 msnm.

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014
7.2	30.1	45.5

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

1434

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068

Director de la Oficina de Servicio al Cliente

Ing Manuel Valverde B.

PROHIBIDA SU REPRODUCCION

TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

PARAMETRO : NO (µg/m³) a las 10 AM

ESTACION DIST: ATE

LONG. DE : 76° 55' "W"

LAT. : 12° 1' "S"

ALT. : 362 msnm.

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014
24.2	64.6	49.3

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068

Ing Manuel Valverde B.

Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : ATE
PARAMETRO : O3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 55' "W"

LAT. AL DEL : 12° 1' "S"

ALT. AL DEL : 362 msnm.

11/02/2014

2.9

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

Ing Manuel Valverde B. Director de la Oficina de Servicio al Cliente

TOTAL O PARCIAL

SENA MHI

OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : ATE LONG. DE : 76° 55' "W"

PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LAT. DE : 12° 1' "S"

ALT. AL DEL : 362 msnm.

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
71	251.4	309.6	251.5

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068 1437

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION: SAN BORJA
PARAMETRO : NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG.: 77° 0' "W"
LAT.: 12° 6' "S"

ALT.: 136 msnm

11/02/2014	16/04/2014
47.9	56.4

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 20160300098 /20160300068

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN
TOTAL O PARCIAL**

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION DISTI : SAN BORJA
PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 77° 0' "W"
LAT. : 12° 6' "S"
ALT. DEL : 136 msnm

DPTO. : LIMA
PROV. : LIMA
DIST. : SAN BORJA

25/12/2013	11/02/2014	16/04/2014	29/01/2015
34.4	62.0	47.4	25.9

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRESISOLIC: 201603000098 /201603000068

1440

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION: SAN BORJA
PARAMETRO : $03 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ a las 10 AM

LONG.: $77^{\circ} 0' \text{ W}$
LAT.: $12^{\circ} 6' \text{ S}$

ALT.: a del : 136 msnm

11/02/2014	16/04/2014
5.7	4.9

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA
LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente
SENAMHI

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : SANTA ANITA

PARAMETRO : O3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 58' "W"

LAT. A DEL : 12° 2' "S"

ALT. A DEL : 276 msnm

16/04/2014
7.8

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRESOLIC: 201603000098 /201603000068

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION DISTI : SANTA ANITA
PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 58' "W"
LAT. : 12° 2' "S"
ALT. : 276 msnm

16/04/2014	29/01/2015
145.7	139.6

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA
LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : SAN JUAN DE LURIGANCHO

PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. : 76° 59' "W"

LAT. : 11° 58' "S"

ALT. : 239 msnm

16/04/2014	29/01/2015
231.2	115.5

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

Ing Manuel Valverde B
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : CARABAYLLO
PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 77° 02' "W"
LAT. DE : 11° 54' "S"
ALT. DE : 190 msnm.

16/04/2014	29/01/2015
184.8	152.1

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA
LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION DISTIC : **SAN MARTIN DE PORRES**
PARAMETRO : **PM10 (µg/m³) a las 10 AM**

LONG. DE : **77° 05' "W"**
LAT. : **12° 00' "S"**
ALT. DEL : **56 msnm.**

16/04/2014
95.7

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016
N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068
1446

Ing Manuel Valverde B
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : VILLA MARIA DEL TRIUNFO
PARAMETRO : NO (µg/m³) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 55' "W"
DPTO. : LIMA
PROV. : LIMA
DIST. : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

25/12/2013
12.3

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/ISOLIC: 201603000098 / 2016030000088

Ing Manuel Valverde B.
Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Oficina General de Estadística e Informática



OFICINA GENERAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ESTACION : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

PARAMETRO : PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 10 AM

LONG. DE : 76° 55' "W"

LAT. DEL : 12° 09' "S"

ALT. A DEL : 292 msnm.

PROV. : LIMA

DPTO. : LIMA

DIST. : VILLA MARIA DEL TRIUNFO

25/12/2013	16/04/2014	29/01/2015
72.1	134.9	190.6

INFORMACION PREPARADA PARA SANDRA TERUYA REVILLA

LIMA, 28 DE MARZO DEL 2016

N° PRES/SOLIC: 201603000098 /201603000068

Director de la Oficina de Servicio al Cliente

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN

TOTAL O PARCIAL

Anexo 6: Datos demográficos del INEI (2014)

Tabla A.1: Datos demográficos del INEI (2014)

Nombre del distrito	Población	Área Km ²	Densidad poblacional Hab/Km ²
PUCUSANA	17044	29.083	586.047
Santa María del Mar	1608	7.753	207.404
San Bartolo	7699	53.638	143.536
Punta Negra	7934	129.652	61.195
Villa el Salvador	463014	33.973	13628.88
Punta Hermosa	7609	121.946	62.396
Lurín	85132	187.631	453.72
Chorrillos	325547	37.015	8795.002
Barranco	29984	2.749	10907.24
Villa María del Triunfo	448545	66.223	6773.251
San Juan de Miraflores	404001	22.254	18154.09
Miraflores	81932	9.149	8955.296
Surquillos	91346	4.629	19733.42
San Isidro	54206	9.7	5588.247
Magdalena del Mar	54656	3.266	16734.84
San Borja	111928	10.359	10804.9
Lince	50228	2.749	18271.37
Santiago de Surco	344242	34.559	9960.994
Magdalena Vieja	76114	4.645	16386.22
La Punta	3655	0.773	4728.331
Jesús María	71589	4.343	16483.77
La Perla	60211	3.309	18196.13
San Luis	57600	3.487	16518.5
San Miguel	135506	9.588	14132.87
Pachacamac	129653	185.898	697.442
La Victoria	171779	9.142	18790.09
La Molina	171646	48.74	3521.666
Bellavista	73489	4.557	16126.62
Breña	75925	3.213	23630.56
Carmen de la Legua Reynoso	41756	1.926	21680.17
Lima	271814	21.428	12684.99
Santa Anita	228422	10.679	21389.83
El Agustino	191365	13.314	14373.22
Cieneguilla	47080	224.97	209.272
Rímac	164911	12.121	13605.4
Ate	630086	84.548	7452.406
Chaclacayo	43428	42.661	1017.979
Independencia	216822	16.083	13481.44

Elaboración propia (2016)

Tabla A.1: Datos demográficos del INEI (2014)

(Continuación)

Nombre del distrito	Población	Área Km²	Densidad poblacional Hab/Km²
Callao	414249	48.987	8456.305
San Martín de Porres	700177	36.674	19091.92
Los Olivos	371229	18.207	20389.36
Comas	524894	48.752	10766.62
Lurigancho	218976	245.856	890.668
San Juan de Lurigancho	1091303	140.404	7772.592
Ventanilla	389440	81.857	4757.565
Puente Piedra	353327	49.047	7203.845
Santa Rosa	18751	17.463	1073.756
Carabaylo	301978	357.276	845.223
Ancón	43382	324.872	133.536

Elaboración propia (2016)

Anexo 7: Gráficos de dispersión IICU Vs Elevación, Distancia a cuerpos de agua, densidad urbana, NDVI, NDBI y uso de suelo

Gráficos de Elevación Vs IICU

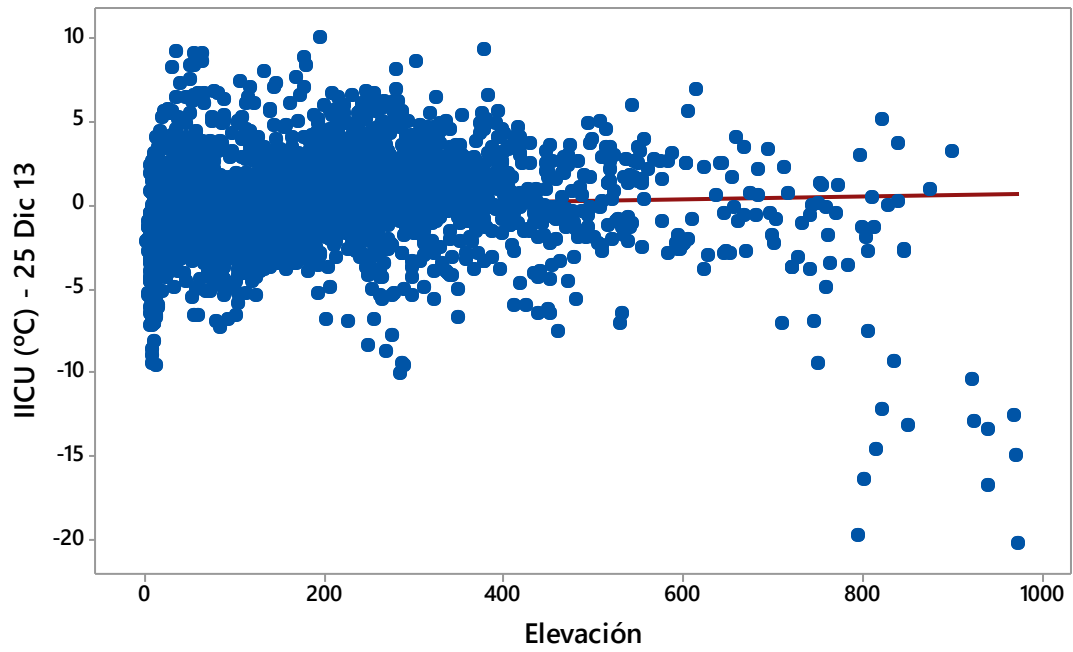


Figura A.28: Gráficos de dispersión de Elevación Vs IICU – 25/12/13

Elaboración propia, 2016

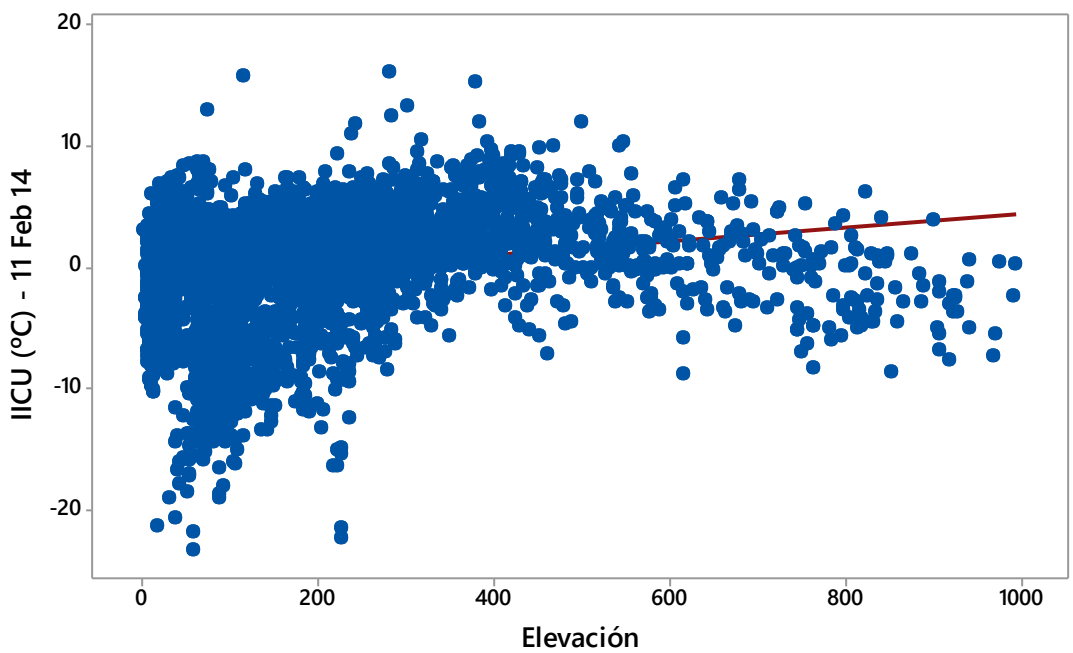


Figura A.29: Gráficos de dispersión de Elevación Vs IICU – 11/02/14

Elaboración propia, 2016

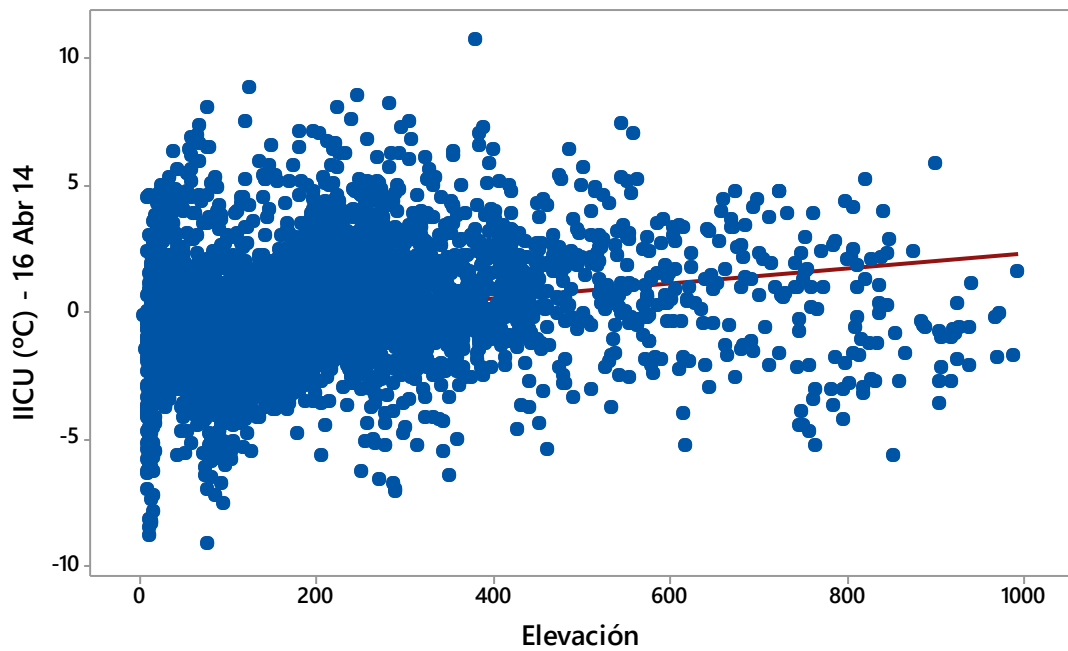


Figura A.30: Gráficos de dispersión de Elevación Vs IICU – 16/04/14

Elaboración propia, 2016

Grafico de dispersión de Elevación Vs IICU - 29 Enero 2015

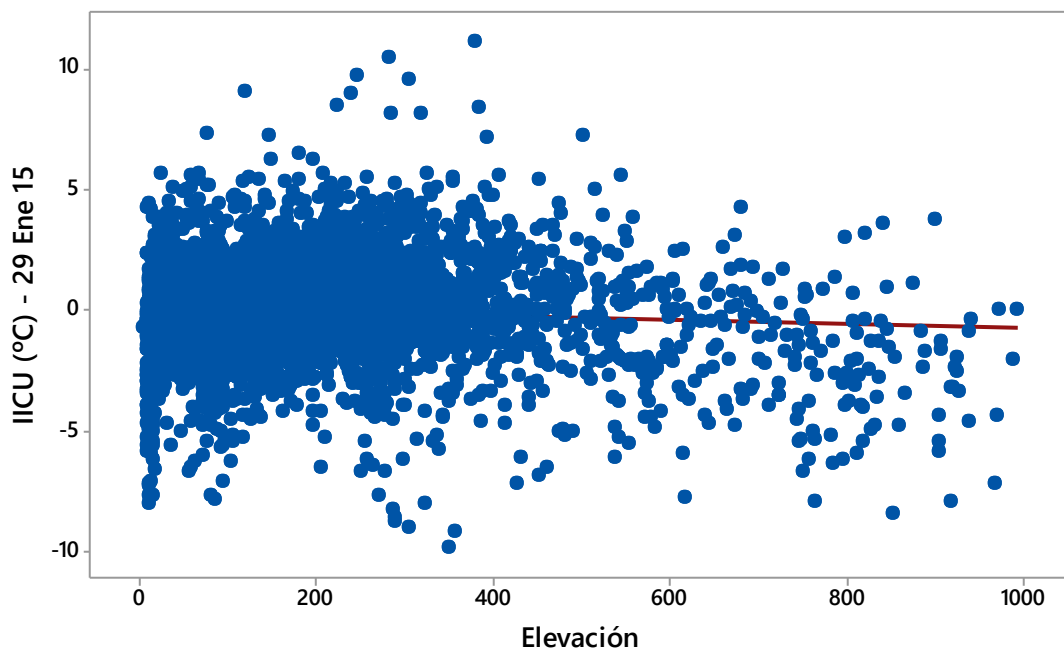


Figura A.31: Gráficos de dispersión de Elevación Vs IICU – 29/01/15

Elaboración propia, 2016

Gráficos de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU

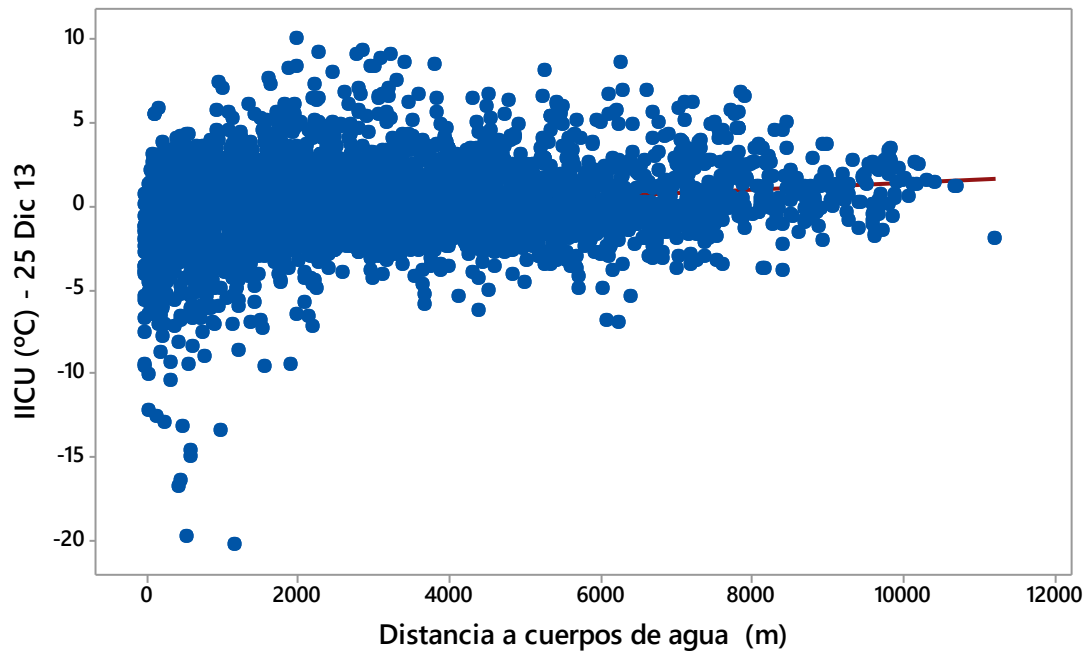


Figura A.32: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 25/12/13
Elaboración propia, 2016

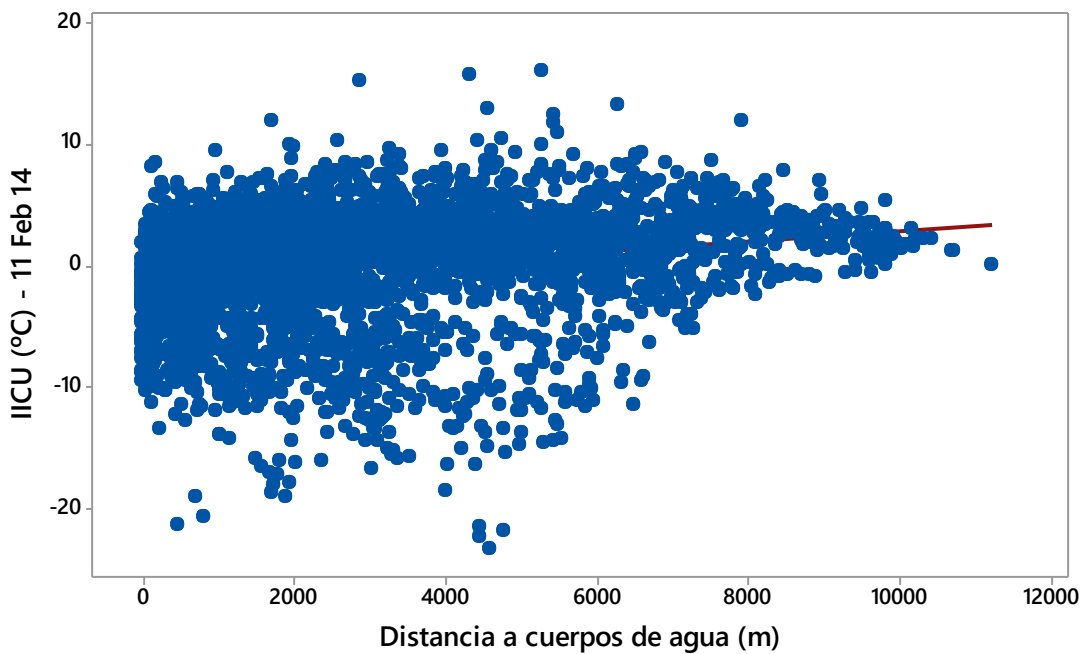


Figura A.33: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 11/02/14
Elaboración propia, 2016

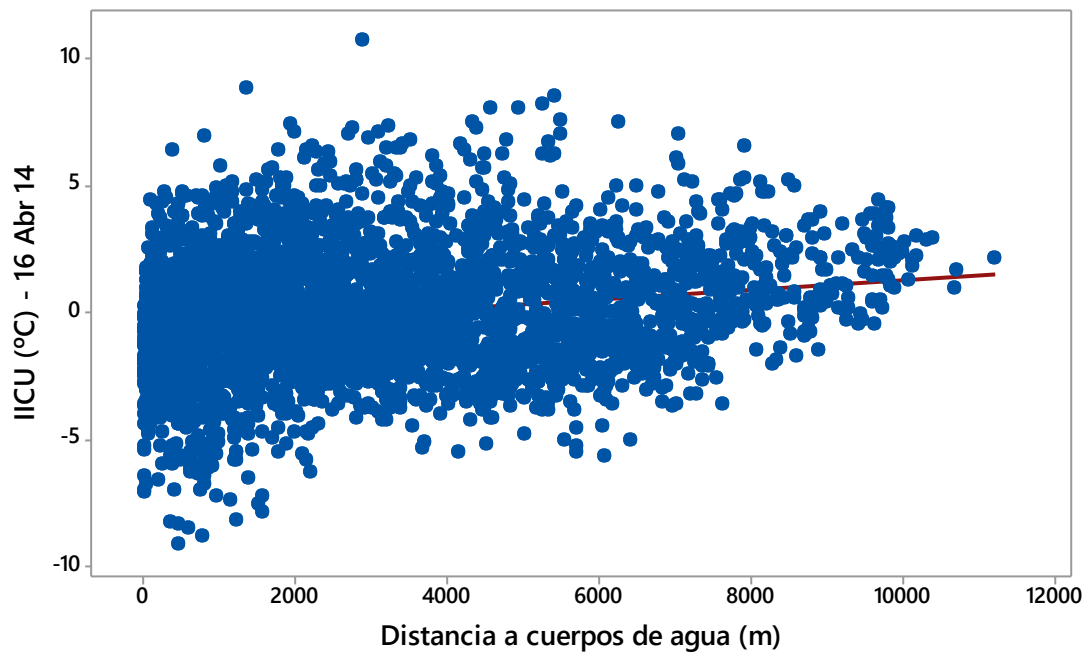


Figura A.34: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 16/04/14
Elaboración propia, 2016

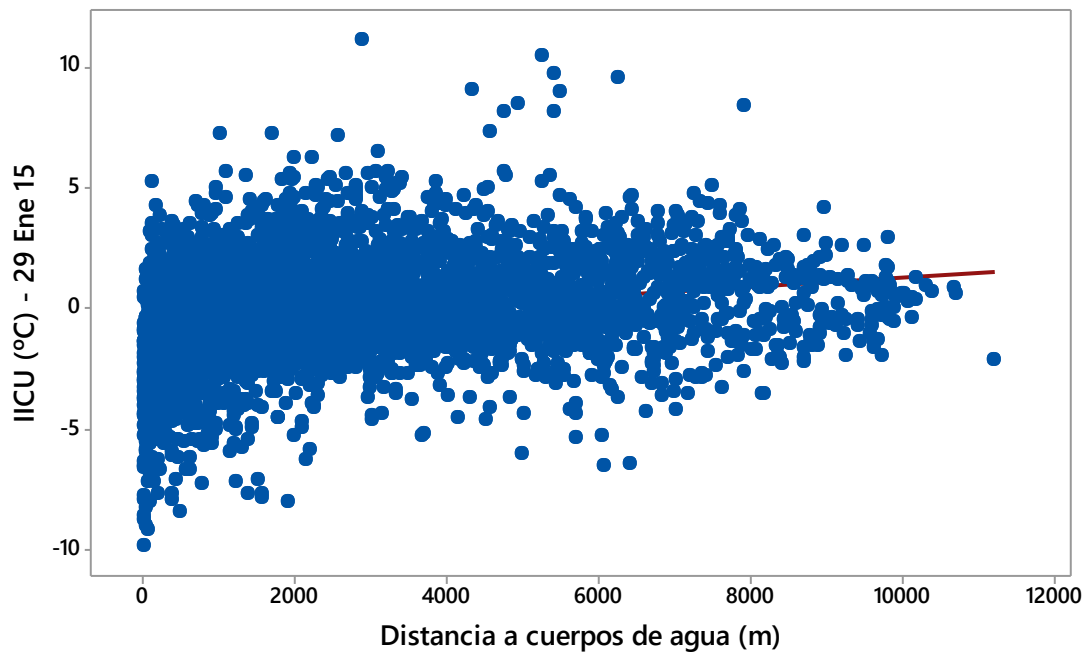


Figura A.35: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 29/02/15
Elaboración propia, 2016

Gráfico de Densidad urbana Vs IICU

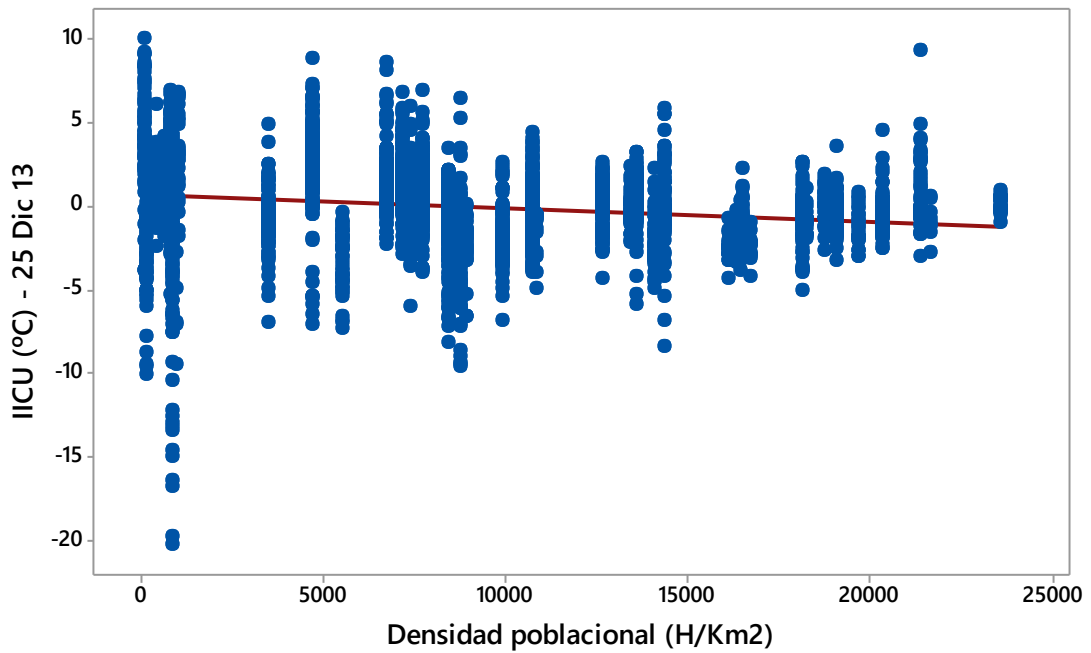


Figura A.36: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 25/12/13
Elaboración propia, 2016

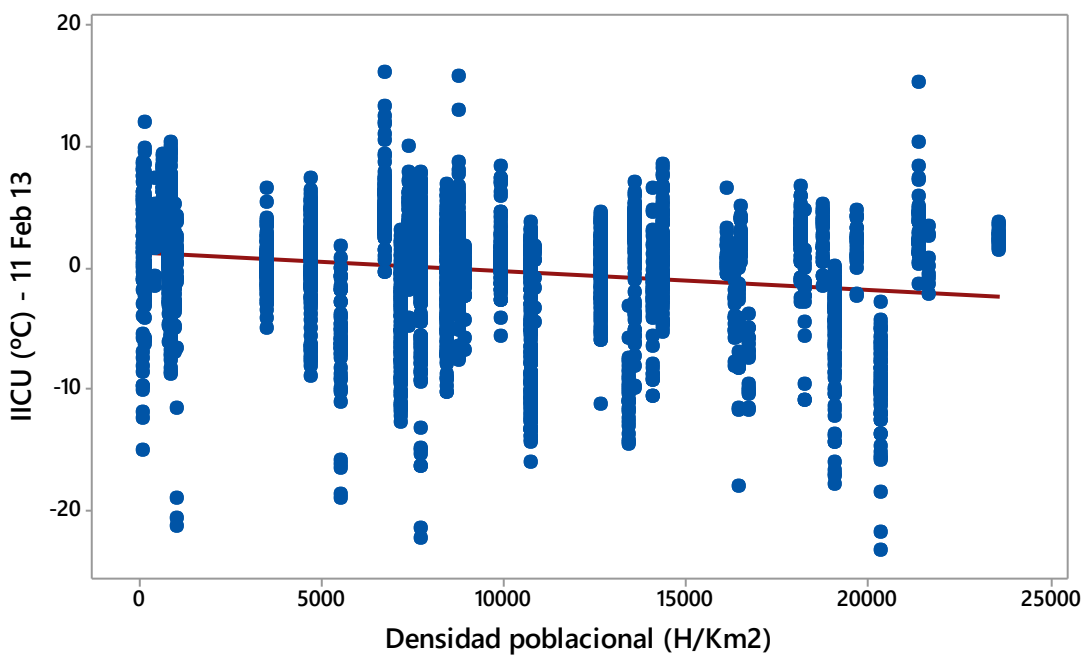


Figura A.37: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 11/02/14
Elaboración propia, 2016

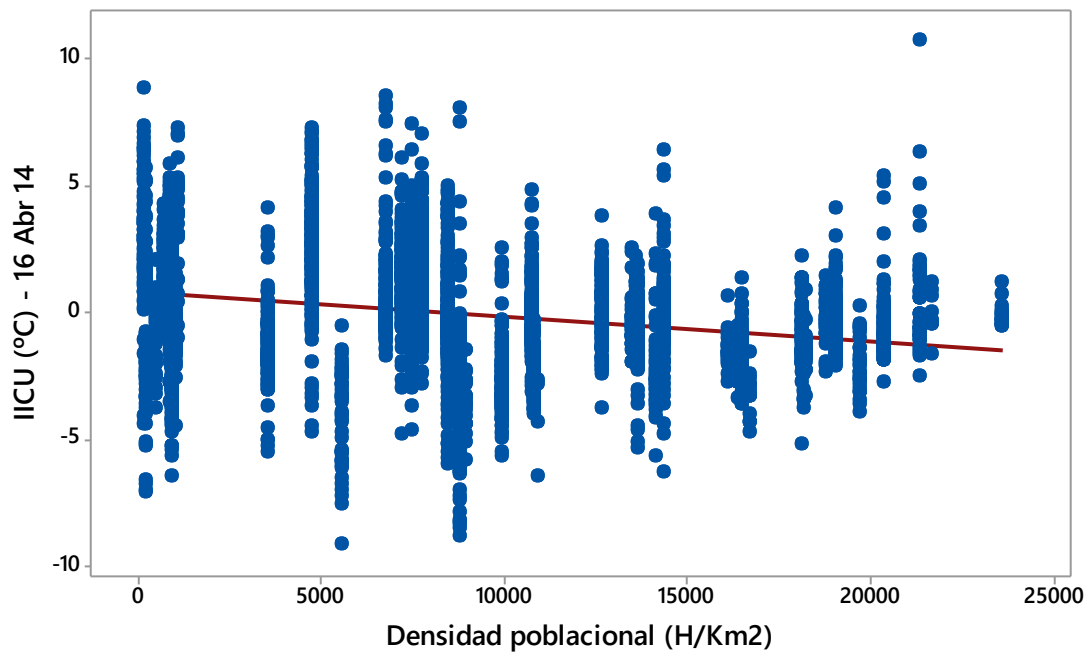


Figura A.38: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 16/04/14
Elaboración propia, 2016

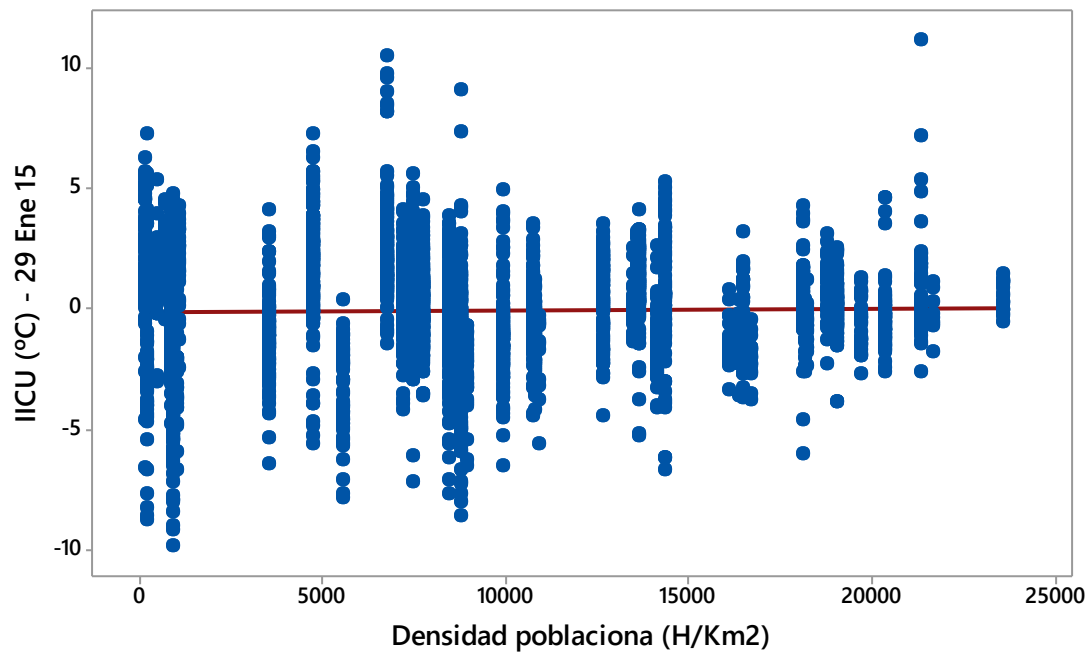


Figura A.39: Gráficos de dispersión de Distancia a cuerpos de agua Vs IICU – 29/01/15
Elaboración propia, 2016

Gráfico NDVI Vs IICU

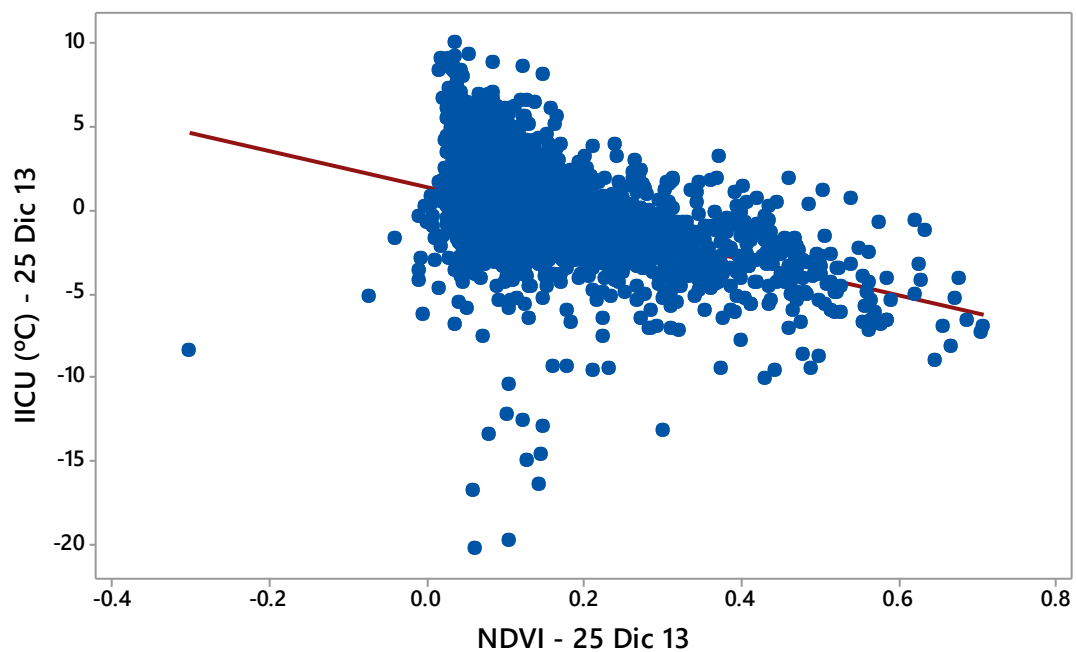


Figura A.40: Gráficos de dispersión de NDVI Vs IICU – 25/12/13

Elaboración propia, 2016

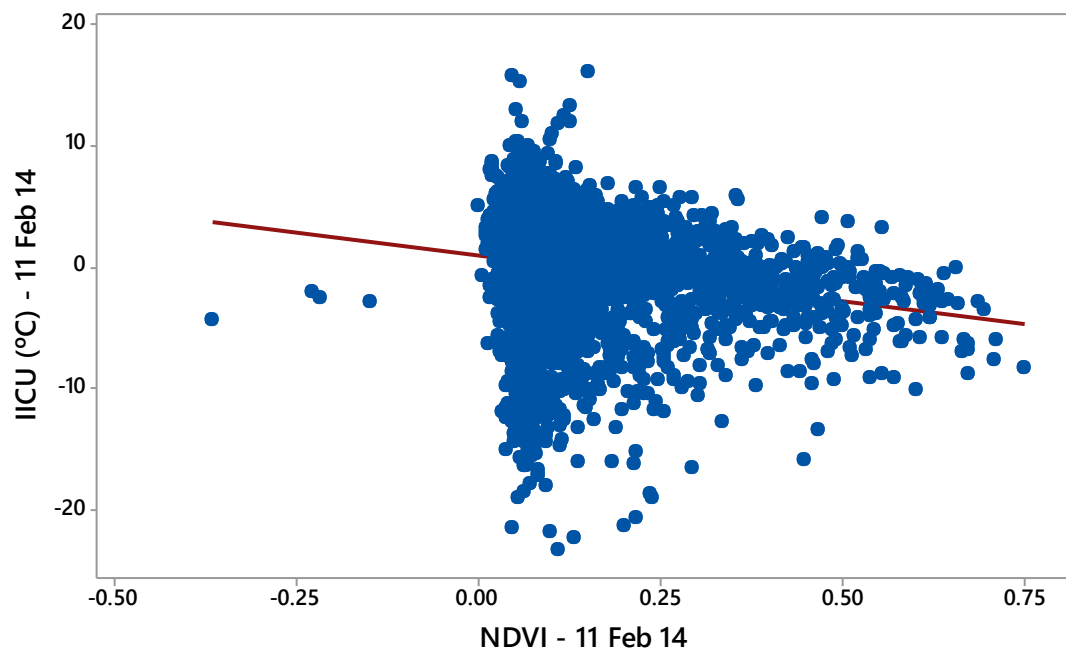


Figura A.41: Gráficos de dispersión de NDVI Vs IICU – 11/02/14

Elaboración propia, 2016

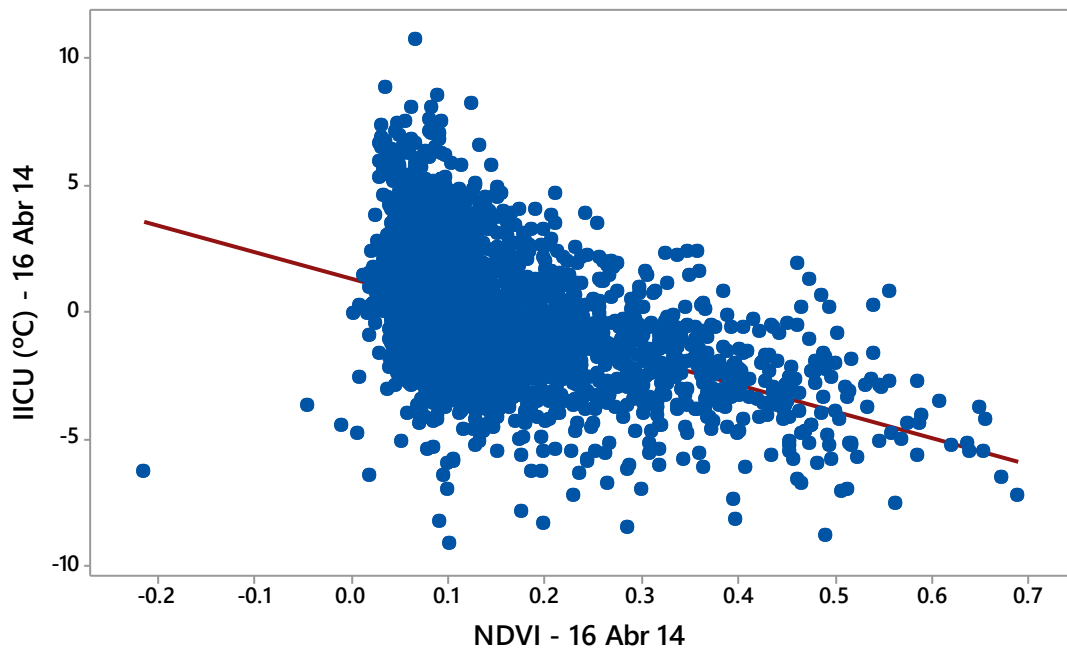


Figura A.42: Gráficos de dispersión de NDVI Vs IICU – 16/04/14

Elaboración propia, 2016

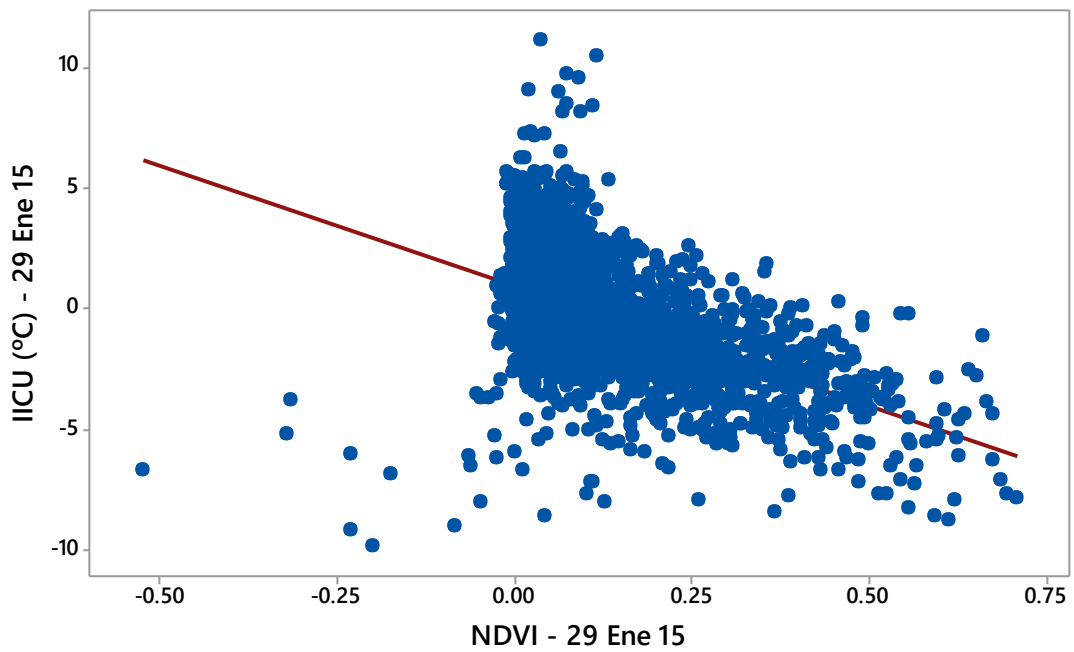


Figura A.43: Gráficos de dispersión de NDVI Vs IICU – 29/01/15

Elaboración propia, 2016

Gráfico de NDBI Vs IICU

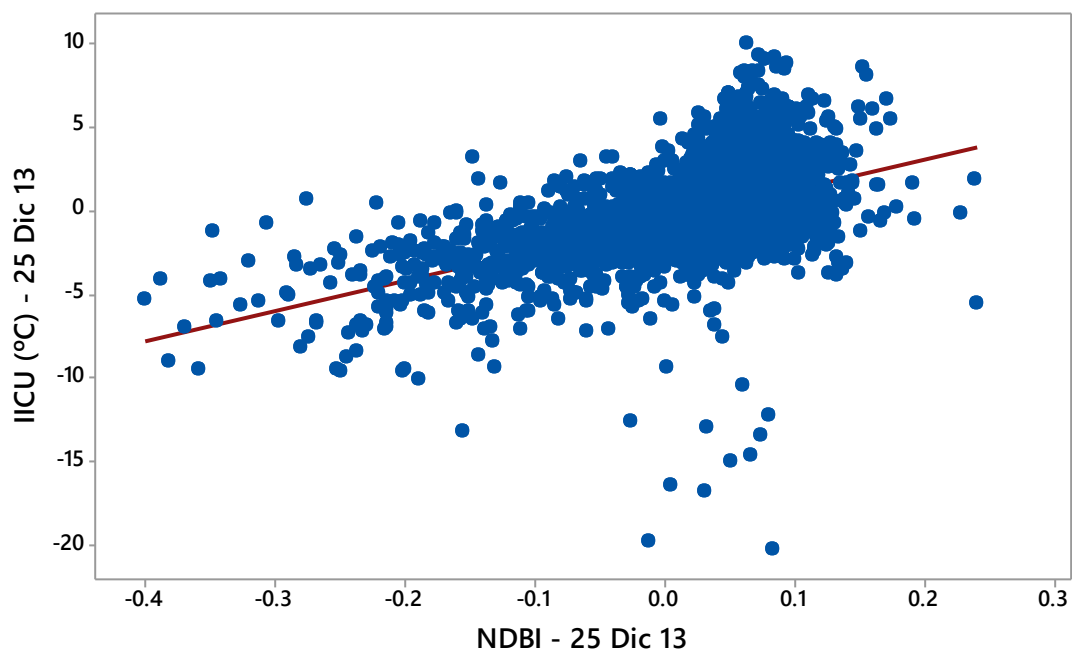


Figura A.44: Gráficos de dispersión de NDBI Vs IICU – 25/12/13

Elaboración propia, 2016

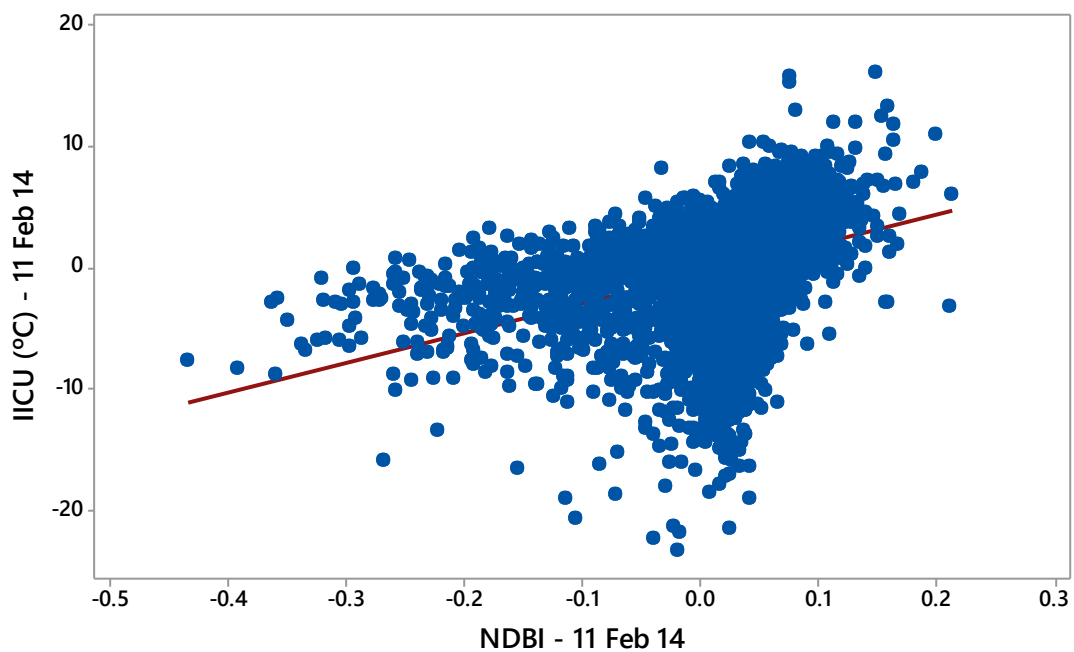


Figura A.45: Gráficos de dispersión de NDBI Vs IICU – 11/02/14

Elaboración propia, 2016

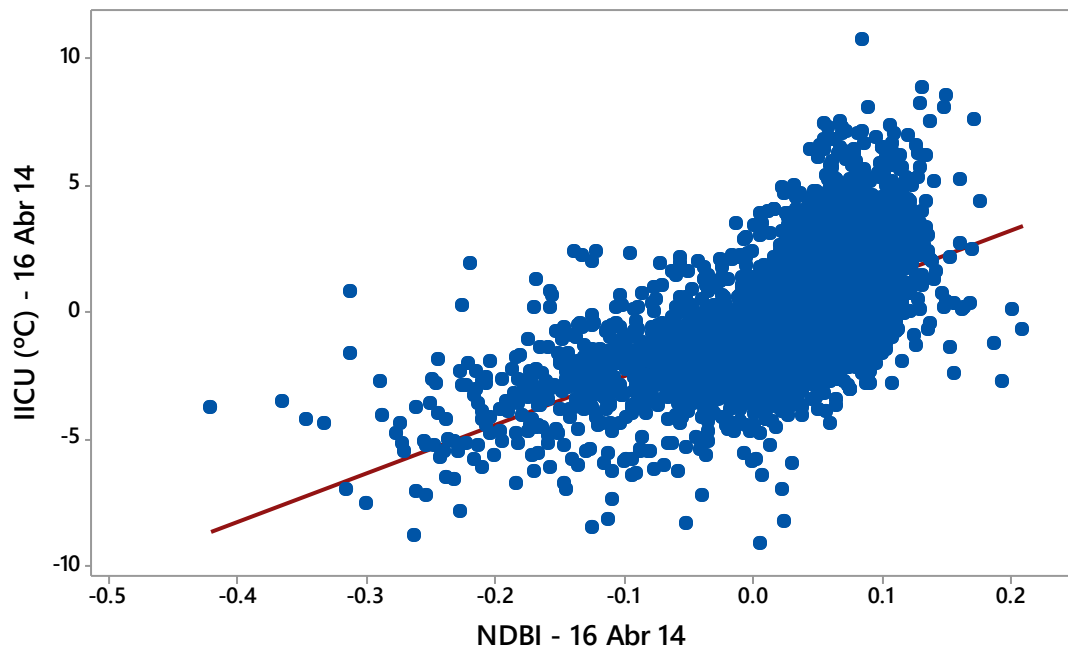


Figura A.46: Gráficos de dispersión de NDBI Vs IICU – 16/04/14

Elaboración propia, 2016

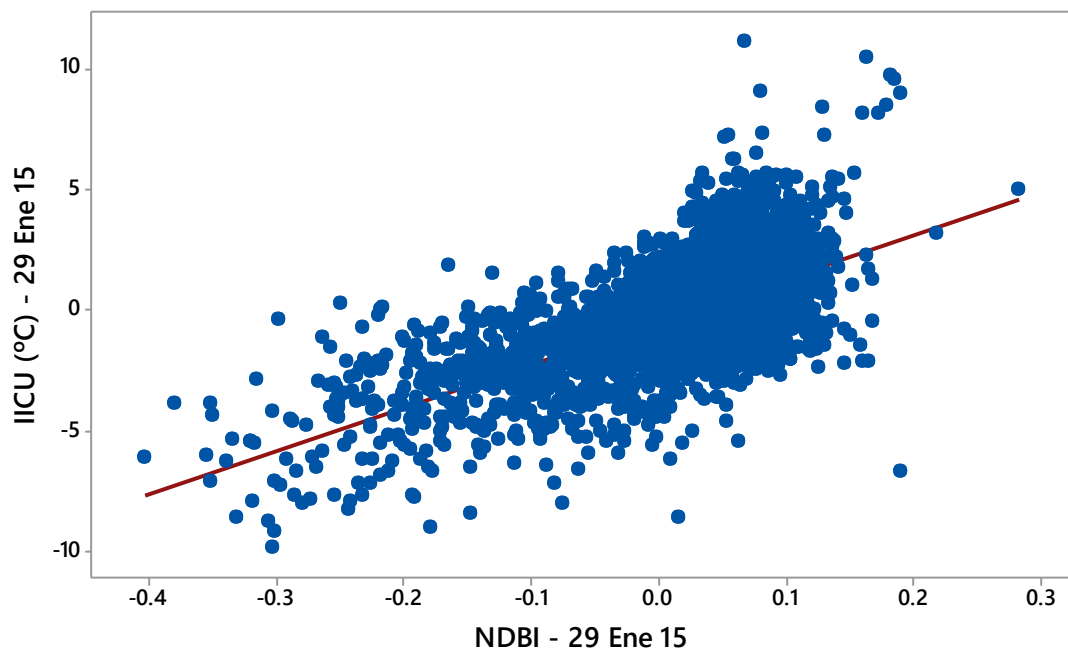


Figura A.47: Gráficos de dispersión de NDBI Vs IICU – 29/01/15

Elaboración propia, 2016