

Daniel Eric Sangines Coral

Metodología de evaluación de la
isla de calor urbana y su utilización
para identificar problemáticas
energéticas y de planificación
urbana

Departamento
Ingeniería Mecánica

Director/es
Turégano Romero, José Antonio

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE
CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA
IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENERGÉTICAS Y
DE PLANIFICACIÓN URBANA**

Autor

Daniel Eric Sangines Coral

Director/es

Turégano Romero, José Antonio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Mecánica

2013

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE
CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA
IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENERGÉTICAS Y
DE PLANIFICACIÓN URBANA.**

DANIEL ERIC SANGINÉS CORAL
INGENIERO MECÁNICO

ZARAGOZA, ABRIL DE 2013

Agradecimientos.

Todo aquel que se afronta a un gran reto en busca de la superación personal, sabe que el camino recorrido para llegar a la meta deseada no es fácil. A lo largo de la aventura hacia el éxito se presentan obstáculos y satisfacciones. En ocasiones aparece la soledad, la tristeza, o la inseguridad acompañadas con preguntas filosóficas sobre la razón de nuestra existencia y porque uno ha asumido un reto donde no se ve el final. En otras ocasiones aparecen momentos de felicidad, euforia y satisfacción personal. De hecho, existen momentos en los que el camino está sumido en la obscuridad y uno no ve claro dónde está el final. Sin embargo, si uno es persistente y sigue andando hacia adelante, se comienza a ver un haz de luz que indica que el final del camino de las metas deseadas. En estos momentos, veo el final del camino, o más bien el inicio de una aventura. Por eso considero de gran importancia agradecer a todos aquellos que me han acompañado a lo largo de esta expedición, agradecer a todos aquellos que han marchado a su patria en busca de su propia aventura, y recordar a los que no están.

En primer lugar, si hay alguien a quien debo agradecer es mi madre y mi padre, que gracias a su ejemplo me han hecho una persona íntegra. De igual manera quisiera agradecer a mis hermanos por todas las aventuras que hemos vivido juntos.

Quisiera agradecer a todos mis amigos de Zaragoza que me han aportado compañía y apoyo estos últimos años. Esto va dedicado cada uno de ellos.

Queda el agradecimiento al Dr. José Antonio Turégano, por haberme acogido como becario OTRI (1060) en el Grupo Energía y Edificación. Su confianza me ha permitido elaborar este trabajo con libertad y gracias a sus ideas y aportaciones ha sido posible la elaboración de esta tesis.

Asimismo, debo agradecer al gobierno de México que a través Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) ha proporcionado los medios económicos necesarios para mi manutención en Zaragoza.

En este contexto también es justo acordarse de las instituciones de alguna u otra forma han hecho posible la elaboración de este proyecto, como lo son el Instituto Geográfico Nacional que mediante el Plan Nacional de Teledetección ha proporcionado imágenes satelitales para el desarrollo de este proyecto, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que ha proporcionado datos meteorológicos, y el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. En especial remarcar mi agradecimiento al Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio por las tutorías proporcionadas y atención prestada.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 Objetivos de la investigación.	17
1.3 Estructura de la tesis.....	18
CAPÍTULO 2. GENERACIÓN, DETERMINACIÓN Y MITIGACIÓN DEL EFECTO DE LA ISLA DE CALOR URBANA.....	19
2.1 Generación de la Isla de Calor en Urbana (ICU).....	20
2.2 Determinación del efecto de isla de calor urbana.....	24
2.2.1 Modelos analíticos.....	24
2.2.2 Modelos numéricos.....	34
2.2.3 Modelado de Mapas del Clima Urbano.....	36
2.3 Mitigación del efecto de la isla de calor urbana.	40
2.3.1 Materiales adecuados en el entorno urbano y en la edificación.....	40
2.3.2 Zonas verdes en el entorno urbano y en la edificación.....	42
2.3.3 Reducción del calor antropogénico.	43
2.3.4 Factores de diseño urbano.	44
CAPÍTULO 3. EXTRACCIÓN DE VARIABLES PARA DETERMINAR EL EFECTO DE ISLA DE CALOR URBANA.....	47
3.1 Área de estudio.....	48
3.2 Clima de Zaragoza	50
3.3 Preparación de datos.	50
3.3.1 Proyección y sistema de coordenadas.....	51
3.3.2 Resolución de celda.	51
3.3.3 Dimensionado espacial.	51
3.4 Datos experimentales de la temperatura urbana.....	52
3.4.1 Transectos urbanos.	53
3.4.2 Estaciones meteorológicas.....	54
3.5 Tratamiento digital de imágenes en teledetección.....	61
3.5.1 Energía radiante.....	62
3.5.2 Radiancia en el techo de la atmosfera con corrección de dispersión atmosférica.	62
3.5.3 Radiancia espectral.....	63
3.5.4 Reflectividad.....	65
3.5.5 Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	67
3.5.6 Emisividad.....	69

3.6	Técnicas teledetección en la estimación de la temperatura superficial terrestre (TST). 70	
3.6.1	Ley de Plank (Temperatura de Brillo Superficial).....	71
3.6.2	Temperatura superficial terrestre (TST).....	71
3.7	Selección de imágenes satelitales.....	72
3.8	Temperatura Superficial Terrestre del entorno urbano.....	74
3.8.1	Primer análisis exploratorio de las imágenes de TST.....	76
3.8.2	Perfil TST en el entorno urbano.....	78
3.9	Aplicaciones en teledetección del Análisis de Componentes Principales.....	91
3.9.1	Análisis Componentes Principales como método de análisis multitemporal TST.....	92
3.10	Vegetación en el medio urbano.....	103
3.10.1	Análisis de Componentes Principales (ACP) como método de extracción de “verdor”. 103	
3.10.2	Transformación “Tasseled Cap” como método de extracción de “verdor”.....	105
3.10.3	Comparación del “verdor” entre Tasseled Cap y Análisis de Componentes Principales. 107	
3.10.4	Perfil del “verdor” en el entorno urbano.....	111
3.11	Clasificación TST de acuerdo al uso de suelo.....	116
3.12	Método TVX para estimar la temperatura del aire.....	117
3.13	Medidas de la forma y espacio urbano, variables extraídas mediante SIG.....	123
3.13.1	Distancia al centro urbano.....	123
3.13.2	Altitud.....	123
3.13.3	Pendiente topográfica.....	124
3.13.4	Distancia a ríos Ebro y Gállego.....	124
3.13.5	Perímetro urbano.....	124
3.13.6	Compacidad urbana.....	124
CAPÍTULO 4.	MAPA ANALÍTICO DEL CLIMA URBANO ZARAGOZA, ESPAÑA.....	131
4.2	Análisis de Conglomerados.....	132
4.3	Categorización y jerarquización de variables.....	135
4.3.1	Categorización de variables.....	135
4.3.2	Proceso Analítico Jerárquico para la obtención de las cargas factoriales.....	141
4.4	Mapa Analítico del Clima Urbano Zaragoza.....	144
4.4.1	Ecuación General del Mapa Analítico de Clima Urbano.....	144
4.4.2	Ecuación del Mapa Analítico de Clima Urbano para Zaragoza, España.....	144
4.4.3	Clasificación Mapa Analítico del Clima Urbano de Zaragoza.....	146
4.5	Calibración y validación de Mapa Analítico del Clima Urbano.....	150

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

4.6	Diagrama metodológico de elaboración de Mapa Analítico del Clima Urbano.....	151
4.7	Mapa Recomendación del Clima de Zaragoza.....	152
4.7.1	Reconocimiento de posibles zonas de actuación.....	153
4.8	Exploración puntual de las variables descriptivas del efecto ICU.	157
4.9	Relación entre demanda de energía y el efecto ICU.	158
4.10	Alternativas de mitigación del clima urbano	162
4.10.1	Materiales adecuados en el entorno urbano y en la edificación.....	162
4.10.2	Zonas verdes en el entorno urbano.....	162
4.10.3	Reducción calor antropogénico.	162
4.10.4	Planeamiento urbano.	163
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		165
5.1	Síntesis.	165
5.2	Contribuciones.....	166
5.3	Perspectivas.....	168
ANEXOS.....		171
5.1	Script ERDAS para generar imágenes de TST.....	171
5.2	Script R para generar ACP multitemporal TST.....	175
5.3	Script R para generar ACP multispectral “verdor”	182
5.4	Script R para generar regresión lineal, comparación “verdor”.	186
5.5	Script R para análisis de conglomerados.....	190
5.6	Script R para Proceso de Análisis Jerárquico.....	194
BIBLIOGRAFÍA.....		195

Índice de figuras.

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Isla de calor Urbana (Oke TR, Boundary Layer Climates, 1978).....	19
Figura 2.2 Esquema de variables controlables y no controlables en la generación de la isla de calor urbana, según Rizwan et al. (2008).	20
Figura 2.3 Variación temporal típica en zonas urbanas y rurales a) temperatura del aire; b) intensidad del clima urbano (ΔT_{u-r}) en condiciones de clima ideal. (Imagen adquirida de Oke,1978).....	22
Figura 2.4 Procesos que interactúan en el clima urbano a mesoescala y microescala (Voogt,2007).....	22
Figura 2.5 a) Evaluación a microescala: CFD del barrio de Valdespartera, Zaragoza ; b) Evaluación a mesoescala: Modelo digital de elevaciones y flujo predominante del aire de la ciudad de Zaragoza.....	24
Figura 2.6 Balance de energía sobre superficies urbanas.....	25
Figura 2.7 Balance de energía de un peatón dentro de un cañón urbano (Pearlmutter et al. 2007).....	27
Figura 2.8 Origen del calor antropogénico en la ciudad de Osaka, valores promedio de agosto 1995-1999 (Narumi et al. 2009).	29
Figura 2.9 Flujo del viento a través de un edificio (ASHRAE, Handbook of fundamentals 2001).	31
Figura 2.10 Balance energético sobre superficies verdes de baja altura.	32
Figura 2.11 Estructura de un Mapa Analítico de Clima Urbano y de un Mapa de Recomendación Urbana (Ng et al., 2009).....	36
Figura 2.12 Mapa Analítico del Clima Urbano para la ciudad de Stuttgart, Alemania (Climate Atlas, 1992).....	37
Figura 2.13 Mapa de Análisis del Clima Urbano, Hong Kong (Ng et al., 2009).....	38
Figura 2.14 Mapa de recomendación urbana para la ciudad de Stuttgart (Climate Atlas, 1992).	39

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Barrios de Zaragoza, España.....	48
Figura 3.2 Clasificación del uso del suelo en Zaragoza, España.....	49
Figura 3.3 a) Rosa de velocidades medias de viento [km/h]; b) Rosa de dirección de vientos [%], Turégano,2008.....	50
Figura 3.4 Localización del área de estudio del efecto ICU.....	52

Figura 3.5 Mapa térmico del mes de julio del 2001 obtenido a través de interpolación geostatística (kriging). (Cuadrat et al., 2002).....	53
Figura 3.6 Mapa térmico del mes de febrero del 2002 obtenido a través de interpolación geostatística (kriging). (Cuadrat et al., 2002).....	54
Figura 3.7 a) Detalle de estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS, b) Estación meteorológica JAIMEN FERRÁN localizada en el polígono de Cogullada.....	54
Figura 3.8 Localización de las sondas meteorológicas dentro de Zaragoza, España.....	55
Figura 3.9 Crossplot de temperaturas ambiente en los días típicos de verano.....	57
Figura 3.10 Crossplot de temperaturas ambiente en las noches típicas de verano.	58
Figura 3.11 Crossplot de temperaturas ambiente en los días típicos de invierno.	59
Figura 3.12 Crossplot de temperaturas ambiente en las noches típicas de invierno	60
Figura 3.13 Fallo de barrido en sensor ETM+ para imágenes posteriores a marzo del 2003.....	73
Figura 3.14 Imagen con fallo en el sensor.....	73
Figura 3.15 . Imagen en falso color (Bandas 4,5,3) con presencia de nubosidad.....	74
Figura 3.16 Aparición de bandeo en banda térmica.....	74
Figura 3.17 . Imágenes TST consideradas para el estudio de ICU.	75
Figura 3.18 Resumen estadístico de las imágenes TST utilizadas para el estudio ICU.	77
Figura 3.19 Recorridos de los ejes urbanos seleccionados.	78
Figura 3.20 Análisis estacional de la TST, eje 1.	80
Figura 3.21 Análisis estacional de la TST, eje 2.	80
Figura 3.22 Análisis estacional de la TST, eje 3.	81
Figura 3.23 Análisis estacional de la TST, eje 4.	81
Figura 3.24 Análisis estacional de la TST, eje 5.	82
Figura 3.25 Análisis estacional de la TST, eje 6.	82
Figura 3.26 Análisis estacional de la TST, eje 7.	83
Figura 3.27 Análisis estacional de la TST, eje 8.	83
Figura 3.28 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 1.	87
Figura 3.29 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 2.	87
Figura 3.30 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 3.	88
Figura 3.31 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 4.	88
Figura 3.32 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 5.	89
Figura 3.33 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 6.	89
Figura 3.34 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 7.	90
Figura 3.35 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 8.	90
Figura 3.36 Varianza explicada de las cargas factoriales extraídas por la matriz de correlación.....	94
Figura 3.37 Agrupamiento de imágenes TST mediante rotación VARIMAX, 2009-2010 y 2003.....	95

Figura 3.38 Agrupamiento de imágenes TST mediante rotación VARIMAX, 1er y 2do semestre 2011.....	96
Figura 3.39 Principal patrón de TST explicado por la primer componente principal (ACP1).....	97
Figura 3.40 Detalle del patrón de TST (ACP1) de los polígonos industriales de Zaragoza.	98
Figura 3.41 Detalle del patrón de TST (ACP1) de edificios del sector terciario.....	98
Figura 3.42 Detalle del patrón TST (ACP1) de parques y jardines.....	99
Figura 3.43 Segundo patrón de TST explicado por la segunda componente principal (ACP2).....	100
Figura 3.44 Evolución de los barrios de Valdespartera y Arcosur (2003 y 2010).....	101
Figura 3.45 Tercer patrón de TST explicado por la cuarta componente principal (ACP3).	102
Figura 3.46 Cuarto patrón de TST explicado por la cuarta componente principal (ACP4).	102
Figura 3.47 Índice de vegetación mediante Análisis de Componentes Principales Multiespectral.....	104
Figura 3.48 Índice de vegetación mediante Tasseled Cap.	106
Figura 3.49 Regresión lineal ACP covarianza-NDVI, 28 de junio del 2011.....	108
Figura 3.50 Regresión lineal Tasseled Cap-NDVI, 28 de junio del 2011.....	108
Figura 3.51 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 20 de febrero del 2011.....	109
Figura 3.52 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 9 de abril del 2011.	109
Figura 3.53 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 28 de junio del 2011.....	110
Figura 3.54 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 7 de septiembre del 2011.	110
Figura 3.55 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 1.....	112
Figura 3.56 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 2.....	112
Figura 3.57 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 3.....	113
Figura 3.58 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 4.....	113
Figura 3.59 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 5.....	114
Figura 3.60 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 6.....	114
Figura 3.61 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 7.....	115
Figura 3.62 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 8.....	115
Figura 3.63 Observación de la TST de acuerdo al tipo de uso de suelo.	116
Figura 3.64 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 20 de febrero del 2011.	119

Figura 3.65 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 9 de abril del 2011.....	119
Figura 3.66 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 7 de septiembre del 2011.....	120
Figura 3.67 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 28 de junio del 2011.....	120
Figura 3.68 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 20 de febrero del 2011.	121
Figura 3.69 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 9 de abril del 2011.....	121
Figura 3.70 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 7 de septiembre del 2011.....	122
Figura 3.71 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 28 de junio del 2011	122
Figura 3.72 Distancia en metros de la Plaza España hacia la periferia.	126
Figura 3.73 Modelo digital de elevaciones.....	126
Figura 3.74 Influencia de los ríos Ebro y Gállego al entorno urbano.	127
Figura 3.75 Influencia del perímetro al entorno urbano.....	127
Figura 3.76 Detalle de generación de puntos sobre parcelas.....	128
Figura 3.77 Detalle de generación de polígonos de Thiessen.	128
Figura 3.78 Polígonos de Thiessen aplicados al entorno urbano.	129
Figura 3.79 Influencia de la compacidad al entorno urbano.	129

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Proceso metodológico propuesto para la elaboración de Mapas Analíticos del Clima Urbano.	131
Figura 4.2 Dendrograma que agrupa todas las variables utilizadas para el estudio ICU.	133
Figura 4.3 Dendrograma simplificado para el estudio ICU.....	135
Figura 4.4 Clasificación del patrón de TST (ACP1) en la ciudad de Zaragoza, España. ..	136
Figura 4.5 Clasificación del verdor urbano en la ciudad de Zaragoza, España.	137
Figura 4.6 Clasificación de la compacidad urbana en la ciudad de Zaragoza, España. ...	138
Figura 4.7 Clasificación de la pendiente del terreno para la ciudad de Zaragoza, España.	139
Figura 4.8 Clasificación de la distancia a ríos para la ciudad de Zaragoza, España.	140
Figura 4.9 Mapa Analítico del Clima Urbano normalizado.	145
Figura 4.10 Relación entre temperatura del aire y PET (Ren et al. 2008).....	146
Figura 4.11 Relación entre velocidad del viento y PET (Ren et al. 2008).....	147
Figura 4.12 Clasificación del impacto en el confort térmico para la ciudad de Zaragoza. (Mapa Analítico del Clima Urbano).....	149
Figura 4.13 Metodología elaboración Mapa Analítica del Clima Urbano.	151

Figura 4.14 Mapa de Recomendación del Clima Urbano para la ciudad de Zaragoza, España.....	153
Figura 4.15 Clasificación de la edificación y densidad de población por edificio, Zaragoza, España.....	155
Figura 4.16 Mapa de Recomendación del Clima Urbano actuando sobre edificios del sector residencial para la ciudad de Zaragoza, España.....	156
Figura 4.17 Mapa de Recomendación del Clima Urbano actuando sobre edificios del sector residencial con densidad de población superior a los 1000 habitantes por parcela edificada, Zaragoza, España.....	156
Figura 4.18 Detalle de la clasificación del impacto en el confort térmico: barrios Las Fuentes y San José.....	157
Figura 4.19 Demanda de refrigeración del mes de agosto para la misma vivienda con tres escenarios de clima urbano (Sanginés et al, 2012).....	160
Figura 4.20 Demanda de calefacción del mes de diciembre para la misma vivienda con tres escenarios de clima urbano. (Sangines et al, 2012).....	160
Figura 4.21 Diversos escenarios de demanda de refrigeración del mes de agosto de acuerdo a la variación de la ICU. (Turégano et al.,2013).....	161
Figura 4.22 Diversos escenarios de demanda de calefacción del mes de enero de acuerdo a la variación de la ICU (Turégano et al., 2013).....	161

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Abstract.

This doctoral thesis will develop a methodology for identifying the Urban Heat Island (UHI) phenomenon getting over the barriers that currently place limits to its evaluation, analyzing and weighting to the variables that cause it. This methodology will be based on a hypothesis that suggests that it is possible to estimate UHI by means of urban environment study. In order to achieve that, teledetection images, Geographical Information Systems and experimental measures were used. This doctoral thesis intends to be used as an additional tool for location analysis and urban planning, since urban microclimate features condition energy demands in future urban developments.

Cuando se utilizan los conceptos “Proyecto urbano” y “Desarrollo sostenible” nos implicamos en una problemática global: la reflexión acerca de la construcción de las sociedades modernas. En otros términos, en el nivel más general nos remite a la actual preocupación teórica acerca de la modernidad y a la construcción de una teoría crítica de la sociedad (Habermas, 1988). Aunque la denominación “Proyecto urbano” surge en Francia en la década de los años setenta, corresponde también a preocupaciones y prácticas que se daban en otros países europeos. En todos los casos, se trata de enfrentar el deterioro y la deshumanización de las ciudades, ocasionados por llevar a cabo tanto la planeación como la rehabilitación urbana con descuido y su falta de mantenimiento.

El proyecto urbano corresponde a una manera de transformación arquitectónica, que toma de manera fundamental a los actores sociales que protagonizan la ciudad de acuerdo ya no a aislados preceptos formales estéticos sino según la dinámica y la participación de esos actores. Es decir, asume la construcción social de la ciudad, y en consecuencia asimila e implica a sus habitantes. Se puede afirmar que la estrategia de proyecto urbano, tanto en nueva construcción como en rehabilitación, se dirige a posibilitar los procesos de configuración, construcción, transformación, conservación, restauración dentro de criterios urbanos específicos.

En este sentido, la planificación urbana debe considerar criterios de economía energética y el adecuado aprovechamiento de los recursos naturales locales encaminados a estudiar las relaciones del Medio Ambiente y el Medio Urbano, determinando y aislando variables interactivas, a fin de comprender la filosofía del urbanismo bioclimático (Higueras, 1997). De acuerdo con Higueras (2006) la ciudad bioclimática no es exclusivamente la suma de edificios tienen integradas técnicas de acondicionamiento pasivo. La nueva escala de ciudad bioclimática implica otro tipo de interacciones y una problemática que es necesario abordar desde una perspectiva sistemática.

En el año 2000, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía publicó una “Guía de planteamiento urbanístico energéticamente eficiente” (IDAE, 2000) donde se estructuran los criterios de diseño urbano a considerar en un urbanismo sostenible. En la sección de recomendaciones se realiza una serie de estrategias para lograr la eficiencia energética urbana, junto con una serie de consideraciones que plantean una estructuración ambiental del territorio:

- Modelos y usos urbanos: análisis del lugar
- Distribución de las zonas edificables y los espacios libres
- Trazado de viales, forma, tamaño y lugar
- Parcelación
- El sistema viario: estudio de tráfico
- Las redes de servicios
- Posición de la edificación y separaciones entre edificios
- Forma del edificio
- La vegetación urbana y las zonas verdes

En este sentido, la presente tesis doctoral pretende servir de herramienta adicional para el análisis del lugar y el planteamiento urbano. Debido a que las características del microclima urbano condicionan las necesidades energéticas de los futuros desarrollos urbanos.

De hecho, esta tesis plantea que la utilización de variables físicas y geoespaciales obtenidas a través de información satelital y SIG permitirá incidir en un determinado proyecto urbano identificando una serie de acciones para mitigar clima urbano existente.

La elaboración de un proyecto urbano es compleja, está sometido a diversas influencias y requiere decisiones que tienen muchos puntos de vista. De tal forma el estudio del clima urbano viene a sumarse como un vector más cuando se pretende llevar a cabo un proyecto urbano integral. Considerando que la carencia de un proyecto urbano y de un urbanismo bioclimático degenera en problemáticas tanto sociales como energéticas.

Dentro de las problemáticas sociales se encuentran: El proceso de transformación urbana en el que la población original de un sector o barrio deteriorado, es progresivamente desplazada por otra de un mayor nivel adquisitivo a la vez que se renueva, término también conocido como gentrificación; la exclusión de las minorías ya sea por raza, credo, nacionalidad, o pobreza; el carecer de servicios

mínimos como el agua y la electricidad; entre muchas otras problemáticas urbanas del ámbito social.

Por otra parte se pueden mencionar como problemáticas energéticas: el comportamiento energético de las edificaciones y su directa relación con los consumos de electricidad, gas, y agua; la manera de producir y suministrar de energía; el sistema de transporte público adaptado las necesidades de la población; y finalmente a dos grandes fenómenos observados en las grandes ciudades: la “Isla de Calor en Urbanizaciones” y en algunas ocasiones la “Isla de Frío en Urbanizaciones”.

La problemática de la elevación de la temperatura en las urbanizaciones ha sido caracterizada como “Isla de Calor Urbana”. Este fenómeno se debe principalmente a la sustitución de los espacios naturales por espacios urbanos y por el incremento de las fuentes artificiales de calor (Oke, 1978). Aunque el efecto de la isla de calor está presente en muchas ciudades, su intensidad varía de comunidad en comunidad de acuerdo un gran número de variables como las condiciones climáticas del lugar, la topografía, la tipología de los edificios, los patrones constructivos de las urbanizaciones, entre otros.

1.2 Objetivos de la investigación.

Esta tesis doctoral tiene como objetivo desarrollar una metodología capaz de representar el Mapa de Clima Urbano¹ de Zaragoza, España, extrayendo de la mejor manera posible las variables físicas y geoespaciales que la originan.

El proyecto pretende:

- Investigar el clima del área en que se asienta Zaragoza y su influencia en el clima urbano.
- Identificar las principales variables que caracterizan la isla de calor urbana.
- Ponderar el impacto de las variables que caracterizan la isla de calor urbana
- Establecer una metodología para elaborar el Mapa del Clima Urbano de Zaragoza, España.
- Realizar una clasificación del territorio de acuerdo a las características de impacto en el confort térmico urbano.
- Reconocer como objetivo final de la tesis las principales estrategias de mitigación de la Isla de Calor.

¹ Un Mapa del Clima Urbano es una herramienta de información cartográfica que presenta características del clima urbano relevante para la planificación y rehabilitación urbana.

NOTA: Las definiciones que se recogen a pie de página aparecen posteriormente en el glosario. Su inclusión en el paginado pretende hacer una lectura más asequible a lectores de ámbitos muy diversos.

1.3 Estructura de la tesis.

El desarrollo de esta tesis doctoral se divide en 5 capítulos y está articulada de forma lineal entre una parte teórica y una parte empírica. Partiendo de este primer capítulo de introducción, donde se presentan los principales objetivos que busca cumplir esta tesis.

El capítulo segundo, está enfocado al estado del arte de la Isla de Calor Urbana (ICU). Aportando una extensa revisión bibliográfica en lo relativo a la generación, determinación y mitigación de la isla de calor urbana.

En el capítulo tercero se presentan una serie de técnicas de extracción de variables físicas y variables geoespaciales para evaluar la isla de calor urbana. El capítulo incluye una descripción detallada del clima de Zaragoza, España; la metodología de extracción de información de imágenes satelitales y el manejo de Sistemas de Información Geográfica como herramienta de análisis de variables espaciales del entorno urbano.

En este mismo capítulo tercero se presentan una serie de criterios para homogenizar la información recabada con el objetivo de poder llevar a cabo los correspondientes estudios estadísticos.

En el capítulo cuarto se presentan una serie de métodos estadísticos para evaluar la Isla de Calor Urbana. En la primer parte del capítulo cuarto se presenta el método estadístico: Análisis de Conglomerados, como método de sustracción de información redundante, aprovechando de esta manera las variables físicas y las variables geoespaciales realmente significativas para describir en su conjunto el efecto de la isla de calor.

En la parte central del capítulo se utiliza el método estadístico determinado: Proceso Analítico Jerárquico, como método de obtención de la carga factorial de cada una de las variables que describen el efecto de isla de calor urbana.

Seguidamente, se propone una ecuación que describe el mapa del clima urbano integrando el Análisis de Conglomerados y el Proceso Analítico Jerárquico. Así mismo, se presenta un método de calibración y validación del modelo propuesto para calibrar y optimizar el correspondiente mapa del clima urbano.

Finalmente, en la última parte del capítulo cuarto, se categoriza el mapa clima de urbano generado con el objetivo de identificar problemáticas urbanas.

En el quinto y último capítulo se presentan las conclusiones más importantes del trabajo realizando presentando los principales aportes que ha generado esta tesis doctoral y enumerando las posibles líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2. GENERACIÓN, DETERMINACIÓN Y MITIGACIÓN DEL EFECTO DE LA ISLA DE CALOR URBANA.

Abstract.

This chapter fixes the concept frame for Urban Heat Island (UHI), detailing a review of associated publications for the phenomenon generation, determination and mitigation. As far as UHI is concerned, the impact of great variables diversity on urban climate change is analyzed. About UHI determination, existing models for temperature change evaluation are shown. These models may be classified as: Analytical models (which evaluate the phenomenon from a physical point view, carrying out an exhaustive energy balance), numerical models (which carry out the evaluation of urban climate by using computational applications implemented by different authors) and the Urban Climate Maps Modeling, where urban climate is analyzed by means of a compilation and evaluation of the existing approaches for urban climate mitigation, proposed by different authors.

Las zonas urbanas tienden a tener una mayor temperatura que las zonas rurales de los alrededores, como resultado de las progresivas modificaciones de la superficie que incluyen la sustitución de la vegetación por edificios y calles (Figura 2.1). Cuando las superficies constructivas y calles absorben una mayor cantidad de radiación solar, se calientan y reflejan energía calorífica al aire circundante provocado una elevación de la temperatura local. Este fenómeno es conocido como “Isla de Calor Urbana” (Oke, 1978; Landsberg, 1981; Voogt et al., 2003; Rosenzweig et al., 2005).

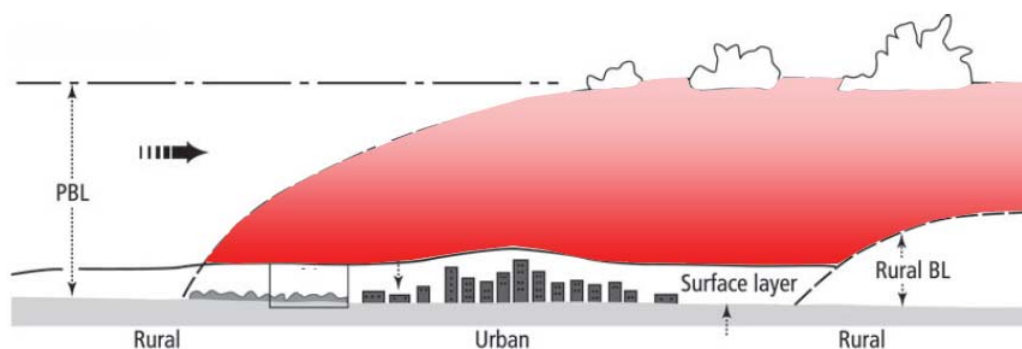


Figura 2.1 Isla de calor Urbana (Oke TR, Boundary Layer Climates, 1978).

Este apartado revisa y resume los estudios más importantes relacionados con el efecto de isla de calor urbana. La literatura existente se puede clasificar en:

- Los estudios enfocados a causas y efectos que generan el efecto de la isla de calor.
- El desarrollo de modelos para lograr su cuantificación.
- En la aplicación de estrategias para lograr su mitigación.

2.1 Generación de la Isla de Calor en Urbana (ICU).

La isla de calor urbana es la respuesta de muchos factores, los cuales pueden ser catalogados como controlables e incontrolables (Figura 2.2). A su vez estos factores pueden ser clasificados como variables temporales en el tiempo, por ejemplo, la velocidad del viento o la cobertura de las nubes; como variables constantes en el tiempo como lo son las zonas verdes, el material de los edificios y el factor de visión del cielo; y como variables cíclicas como la radiación solar o las fuentes de calor antropogénico (Rizwan et al., 2008).

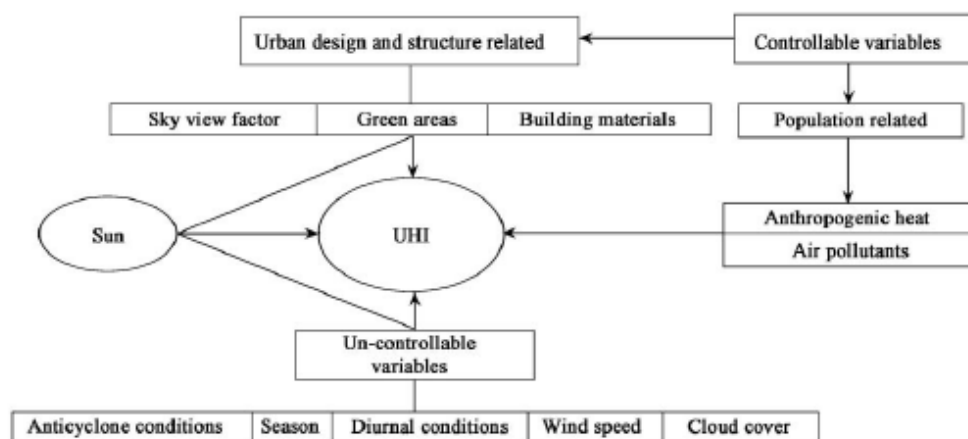


Figura 2.2 Esquema de variables controlables y no controlables en la generación de la isla de calor urbana, según Rizwan et al. (2008).

El calor contenido y generado en las zonas urbanas proviene del sol en forma de radiación solar y de diversas fuentes de calor antropogénicas, como automóviles y sistemas de aire acondicionado. La mayoría de este calor antropogénico es emitido directa e instantáneamente al ambiente. Por otro lado la emisión de calor por radiación solar, es más compleja. Una parte es absorbida por las estructuras urbanas y otra parte es reflejada al medio ambiente. La transferencia de calor y los procesos de conservación de energía, como la conducción, convección, y radiación juegan un rol importante en el balance de calor del entramado urbano.

Las estructuras urbanas: como fachadas, cubiertas, suelo, zonas verdes, entre otras absorben y almacenan radiación durante el transcurso del día, y esto lo hacen de diferente manera dependiendo de los materiales con los que están constituidas. Al atardecer, el medio ambiente comienza a enfriarse y la energía térmica almacenada en las estructuras es liberada en forma de flujo de calor.

De acuerdo con Giridharan et al. (2004), los factores importantes a considerar en la generación de la ICU son el factor de visión del cielo² y el albedo³. Por una

² Visión del cielo: (Sky View Factor) Porcentaje de cielo visible desde cualquier punto.

³ Albedo: Razón entre la energía luminosa que difunde por reflexión una superficie y la energía incidente.

parte, la capacidad de liberar energía por la radiación de onda larga es reducida debido a la disminución del factor de visión del cielo y en consecuencia existe un almacenamiento de calor en las superficies constructivas de los edificios. Por otra, la cantidad de luz reflejada es menor en comparación con la luz incidente, en otras palabras, el albedo es generalmente bajo en las zonas urbanas.

El efecto de la densidad de población ha sido analizado por varios autores. En el estudio realizado por Hung et al. (2006), analizaron doce ciudades de Asia y correlacionaron el número de habitantes con el incremento de la ICU. Según Kim et al. (2004), la densidad de población tiene dos efectos en la generación de la ICU, una directa y otra indirecta. La directa está relacionada con el metabolismo de las personas, a mayor número de personas es mayor el calor emitido por las mismas; y la indirecta, que influye de manera más significativa en el efecto de la ICU, pues a mayor población se incrementa el número de edificios, vehículos, fábricas, etc.

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

La contaminación del aire y altos índices de ozono también son causas de un aumento de la ICU. De acuerdo con Rosenfeld et al. (1998), las partículas de los aerosoles que son abundantes en grandes ciudades, pueden absorber y emitir radiación de onda larga, limitando la captación de radiación directa en las estructuras urbanas y generando un efecto invernadero en la ciudad y por tanto se presenta una elevación de la temperatura urbana.

También existen variables temporales como las condiciones climáticas y anticiclónicas que incrementan la ICU (Pongracz et al., 2006). Por ejemplo la velocidad del viento y la cobertura de las nubes son factores que están directamente correlacionados con la elevación del efecto ICU (Kim et al., 2005). Por otra parte, Klysik et al. (1999) han reportado que aún con velocidades de viento de 4 m/s durante la noche y velocidades de 2 m/s durante el día, es posible apreciar el efecto ICU.

La ICU varía a lo largo del día, alcanzando su máximo efecto pocas horas después de la puesta del sol. Esto es debido a que la energía absorbida por las superficies urbanas es liberada lentamente en comparación con las superficies rurales (figura 2.3). Diversos autores (Saitoh et al., 1995; Lemonsu et al., 2002; Jauregui, 1997) han obtenido diferentes valores del efecto ICU ($\Delta T_{\text{Urbano-Rural}}$). Un valor razonable del efecto ICU se encuentra entre 5-8°C, sin embargo Klysik et al. (1999) han encontrado un $\Delta T_{\text{Urbano-Rural}}$ superior a los 12°C en Polonia. Por otra parte, el

menor efecto de la ICU ($\Delta T_{\text{Urbano-Rural}}$) se presenta en las primeras horas de la mañana, incluso presentándose la posibilidad de que las zonas urbanas sean más frescas que las del entorno. La presencia de una isla de frío urbano ($\Delta T_{\text{Urbano-Rural}} < 0$) puede ocurrir con diferente frecuencia e intensidad dependiendo de la climatología regional del entorno urbano.

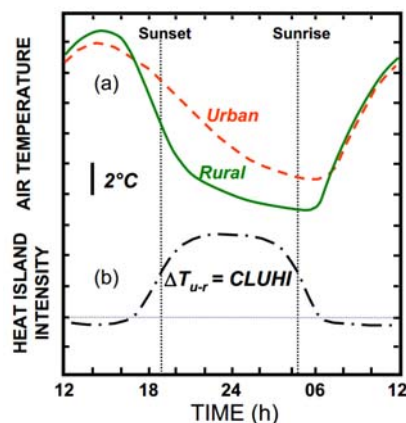


Figura 2.3 Variación temporal típica en zonas urbanas y rurales a) temperatura del aire; b) intensidad del clima urbano (ΔT_{u-r}) en condiciones de clima ideal. (Imagen adquirida de Oke,1978)

La transformación del terreno asociado a las actividades urbanas modifica el clima urbano a micro-escala y a meso-escala. Los procesos a micro-escala presentan perturbaciones atmosféricas debido al planeamiento urbano, por ejemplo la presencia de calles, edificios y parques. Por otro lado los procesos a meso-escala varían de decenas a cientos de kilómetros, en este contexto incluyen las perturbaciones de la superficie urbana en el clima y la velocidad del viento de la región.

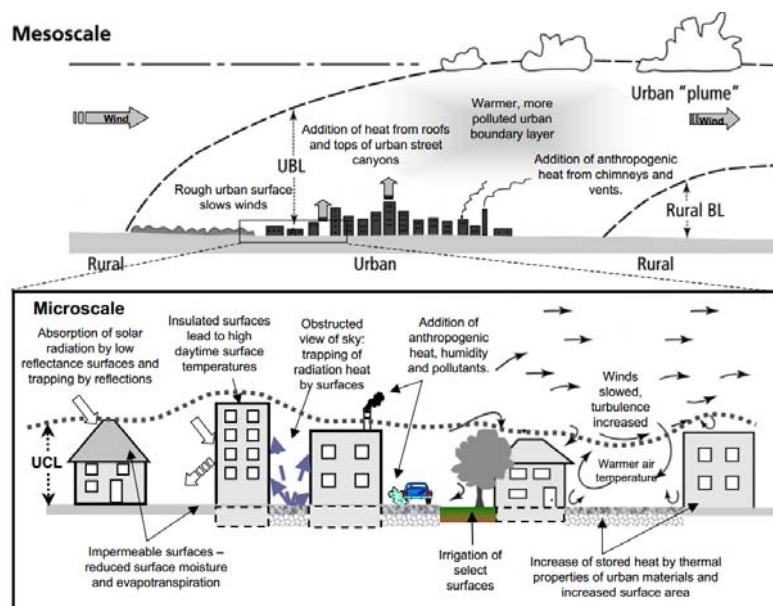


Figura 2.4 Procesos que interactúan en el clima urbano a mesoescala y microescala (Voogt,2007)

Por debajo de las cubiertas de los edificios los procesos a micro-escala son responsables de la formación de una Capa bajo la Cubierta Urbana (*Urban Canopy Layer, UCL*) donde el clima puede variar significativamente en pequeñas distancias debido a la interacción entre los procesos atmosféricos y los elementos urbanos. En otras palabras, el microclima urbano es influenciado básicamente por las características del entorno urbano como lo son el diseño de los edificios, la orientación de las calles, el tipo de actividad o la presencia de vegetación. Sobre la Capa de la Cubierta Urbana, la Capa Límite Urbana (*Urban Boundary Layer*) interactúa con los fenómenos atmosféricos por la presencia de una superficie urbana. En este sentido la escala espacial de los procesos que ocurren en la Capa Límite Urbana (meso escala) es mucho mayor que la escala espacial de los procesos que ocurren bajo la Capa de la Cubierta Urbana (micro escala), sin embargo ambas capas están relacionadas por que una condiciona a la otra (Oke, 1978).

Durante el día, en caso de ausencia o reducida velocidad de viento, la influencia del clima urbano de la ciudad sobre la capa limite urbana puede ser entre 0.6-1.5km, sobre la Capa limite rural. Durante la noche, la Capa Limite Urbana puede variar entre 0.1-0.3km debido a que la estabilidad atmosférica reduce la transferencia vertical de calor del aire. Otro fenómeno que es posible encontrar en caso de ausencia o reducida velocidad del viento es la formación de una brisa de aire caliente que asciende por encima de la superficie urbana: el flujo de aire será divergente en los niveles más altos la Capa Limite urbana y descenderá de forma lenta y de manera convergente lejos de la zona urbana (Oke, 1978). En este caso de recirculación de aire la concentración de gases contaminantes puede incrementarse dentro de la Capa Limite Urbana.

Un ejemplo de estudio a micro-escala se muestra en la figura 2.5a. En la imagen se aprecia un estudio CFD (Computer Fluid Dynamics) del barrio de Valdespartera con el objetivo de visualizar y cuantificar la velocidad del viento a través de los edificios. Por otra parte en la figura 2.5b se muestran los principales patrones del viento a través de la ciudad de Zaragoza en una evaluación a meso-escala.

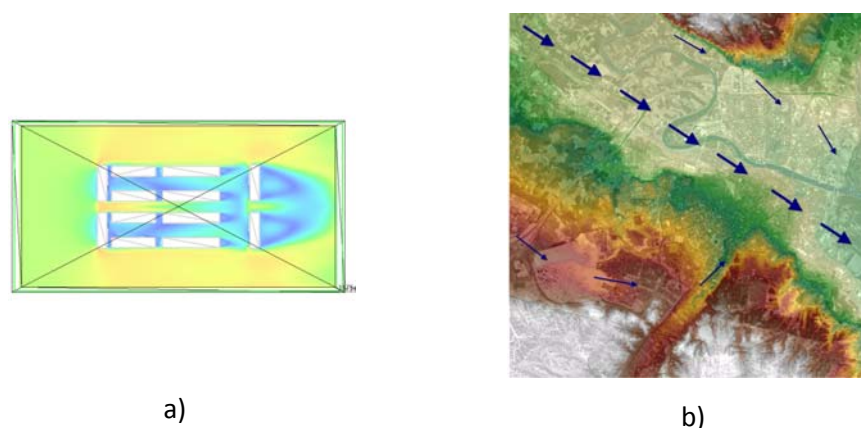


Figura 2.5 a) Evaluación a microescala: CFD del barrio de Valdespartera, Zaragoza ; b) Evaluación a mesoescala: Modelo digital de elevaciones y flujo predominante del aire de la ciudad de Zaragoza.

2.2 Determinación del efecto de isla de calor urbana.

Para comprender el efecto ICU es necesario entender los fenómenos físicos que ocurren y las fuerzas que la originan. En este apartado se repasarán los distintos tipos de modelos existentes para determinar el efecto ICU.

Los modelos analíticos repasan los conceptos de transferencia de calor, las propiedades del aire, los efectos de la calidad del aire, y los fenómenos de radiación y convección en las zonas urbanas.

Los modelos numéricos para calcular el efecto ICU están basados en fórmulas simplificadas generalmente obtenidas de manera experimental bajo ciertas condiciones que hacen que su uso sea restringido dentro de ciertos límites de validez. Diversos autores han desarrollado herramientas informáticas capaces de estimar el efecto ICU y han marcado las pautas de diseño para mitigar este efecto. Aunque la mayoría de la veces sus herramientas generalizan problemáticas, extrapolan criterios de diseño o tabulan buenas prácticas de mitigación, estas herramientas son útiles porque ofrecen una primera estimación del efecto ICU.

Por último, el modelado de Mapas del Clima Urbano utiliza la caracterización de variables físicas y geo-espaciales para determinar el efecto ICU. La ventaja de este tipo de modelos estriba en que las variables obtenidas por estos métodos están directamente asociadas a la realidad urbana, a diferencia de los modelos analíticos o los modelos numéricos que solo realizan una estimación teórica.

2.2.1 Modelos analíticos

Los modelos analíticos utilizan las ecuaciones de transferencia de calor para reproducir el fenómeno ICU. Para ello dependiendo del tipo de superficie analizada o espacio urbano tratado existe una ecuación que modela la temperatura urbana. Por lo tanto el modelado de la ICU es diferente en las zonas urbanas y en las zonas verdes. Esto debido a que en las zonas verdes ocurren

procesos biológicos y se presenta de manera notoria el fenómeno de evapotranspiración⁴(Montgomery, 1987).

A continuación se presenta el balance energético sobre superficies urbanas y posteriormente se presenta el balance energético sobre superficies verdes.

2.2.1.1 Balance energético sobre superficies urbanas

El calor generado por las superficies urbanas puede ser estimado con el balance de energía propuesto por Nuñez (1977):

$$Q^* + Q_A = Q_h + Q_s + Q_{AD} \quad (2.1)$$

Donde Q^* es el total de la radiación incidente, Q_A es la transferencia de calor por fuentes antropogénicas, Q_h es la transferencia de calor por convección, y Q_s es el calor sensible almacenado en las superficies urbanas y Q_{AD} es flujo de calor por advección⁵ (Figura 2.6).

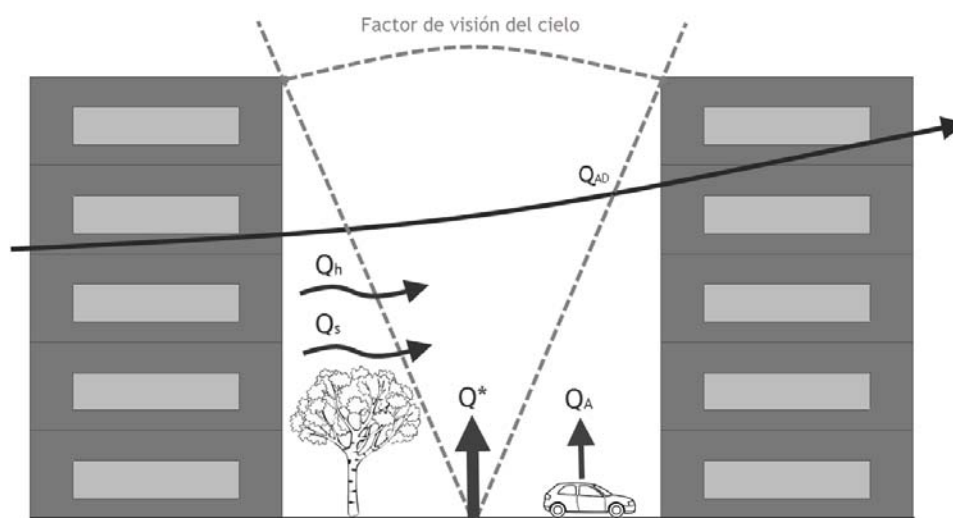


Figura 2.6 Balance de energía sobre superficies urbanas

Radiación total incidente, $Q^* = Q_{RSV} + Q_{ROL}$.

La cantidad de radiación incidente que consideramos es la suma de la radiación de solar visible (RSV) y la radiación de onda larga (ROL) capturada por las superficies constructivas.

⁴ Evapotranspiración: Pérdida de agua por evaporación directa de la planta que sale al medio exterior por transpiración.

⁵ Advección: La penetración de una masa de aire frío o cálido por causas meteorológicas.

Radiación solar visible, Q_{RSV} .

La radiación solar visible es la que incide sobre una superficie, esta depende directamente de diversos factores, como el tamaño y situación de la propia superficie, y de condiciones atmosféricas y estacionales.

Este tipo de radiación puede ser medida en términos de potencia o de energía, según se trate de establecer la cantidad de energía incidente en un periodo de tiempo o de forma instantánea. Este tipo de radiación es la suma de dos magnitudes que se conocen como radiación directa y radiación difusa.

El concepto de radiación directa implica exposición al Sol, de modo que recoge la cantidad de energía transmitida a las superficies por los propios rayos de Sol. De este modo, en caso de existir un obstáculo que proporcione sombra a la superficie, este término es nulo. Dichos obstáculos pueden ser de lo más variado, incluyendo horizonte, arbolado, edificios cercanos, entre otros.

La radiación difusa es la suma de aportes de radiación que ha incidido y rebotado en algún lugar. Esta radiación es isotrópica y por lo tanto no depende de la orientación o la inclinación de la superficie, sino de las propiedades del entorno en el que sitúa. Su origen es muy variado, dado que una superficie expuesta en un lugar general recibe tanto reflexiones de radiación directa desde la atmósfera, proveniente de moléculas de CO₂, agua u otras partículas como reflexiones del entorno en función del albedo.

Así pues, se establece el concepto de radiación global sobre una superficie como la suma de los términos de radiación directa y difusa sobre dicha superficie. La radiación global incidente en las superficies urbanas puede ser reducida o limitada por altos niveles de contaminación atmosférica (Sang et al., 2000), incluso esta atenuación ha llegado a ser superior al 33% en algunas ciudades (Stanhill et al.1995).

Radiación de onda larga, Q_{ROL} .

Además de la radiación visible proveniente del sol, las superficies urbanas emiten radiación de onda larga. También conocida como radiación infrarroja. La radiación de onda larga no es visible para el ojo humano pero sus efectos se muestran al emitir energía térmica al medio ambiente. Este tipo de radiación depende directamente de las propiedades del material de las superficies constructivas y de su relación con el entorno y se caracteriza por emitir la energía térmica en el infrarrojo lejano.

Las propiedades de los materiales más significativas en la emisión de radiación de onda larga son su absortancia⁶ (α), su emisividad⁷ (ε), la temperatura superficial

⁶ Absortancia: Relación entre el flujo de radiación absorbida por una superficie y la radiación total que incide sobre ella.

⁷ Emitancia: Proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura radiativa con su entorno.

de emisión, y su inercia térmica⁸. De acuerdo con Chapman et al. (1984), la temperatura de cada superficie constructiva debe considerarse uniforme y la energía radiante que fluye hacia al exterior es igual en toda la superficie.

Los factores ambientales a considerar en el flujo de calor por radiación de onda larga son: la temperatura del suelo, el albedo del terreno, la temperatura del cielo y el factor de visión del cielo.

En forma más explícita podemos detallar Q^* de la forma siguiente. La radiación total recibida en un cañón urbano⁹ se puede determinar mediante la expresión propuesta por Pearlmutter et al. (2007). En su balance de energía han propuesto un cilindro vertical situado en el centro del cañón urbano, en el supuesto que el cilindro es un peatón que interacciona con el medio urbano.

$$Q^* = (K_{dir} + K_{dif} + \alpha_h K_h + \alpha_v K_v)(1 - \alpha_s) + LWR_{cielo} + LWR_h + LWR_v - \varepsilon_s \sigma \quad (2.2)$$

donde K_{dir} y K_{dif} son la radiación directa y la radiación difusa incidente sobre un cilindro vertical; $\alpha_h K_h$ y $\alpha_v K_v$ es la radiación reflejada por las superficies horizontal y vertical del cañón urbano; α_s es el albedo del cilindro vertical; LWR_{cielo} , LWR_h , LWR_v son la radiación de onda larga emitida por el cielo, por las superficies horizontales y las superficies verticales; ε_s es la emisividad superficial del cilindro vertical; σ es la constante de Stefan-Boltzmann; y T_s es la temperatura superficial (K) del cilindro vertical (Figura 2.7).

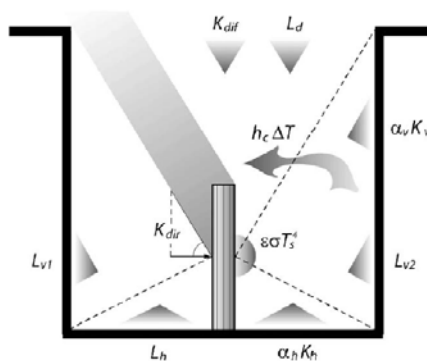


Figura 2.7 Balance de energía de un peatón dentro de un cañón urbano (Pearlmutter et al. 2007)

Las superficies urbanas exteriores, la superficie del suelo y el cielo emiten radiación de onda larga y esta puede ser estimada con la expresión de Walton et al. (1983).

$$Q_{LWR} = LWR_{vertical} + LWR_{horizontal} + LWR_{cielo} \quad (2.3)$$

⁸ Inercia térmica: Propiedad que indica la cantidad de energía térmica que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe

⁹ Cañón urbano: Relación entre la altura de los edificios y el ancho de las calles (H/W).

Aplicando la ley de Stefan-Boltzman la expresión queda de la siguiente manera:

$$Q_{LWR} = \varepsilon\sigma F_v(T_v^4 - T_{aire}^4) + \varepsilon\sigma F_h(T_h^4 - T_{aire}^4) + \varepsilon\sigma F_{cielo}(T_{cielo}^4 - T_{aire}^4) \quad (2.4)$$

donde:

ε = emisividad de onda larga de la superficie

σ = Constante de Stefan-Boltzman

F_v = Factor de visión que relaciona una superficie urbana con una superficie vertical

F_h = Factor de visión que relaciona una superficie urbana con una superficie horizontal

F_{cielo} =Factor de visión del cielo

T_v =Temperatura de una superficie vertical urbana

T_h =Temperatura superficial del suelo

T_{cielo} =Temperatura del cielo

T_{aire} =Temperatura del aire

Los factores de visión de onda larga han sido calculados por Walton et al. (1983) como:

$$F_v = 0.5(1 - \cos\phi) \quad (2.5)$$

$$F_h = 0.5(1 + \cos\phi)\beta \quad (2.6)$$

$$F_{cielo} = 0.5(1 + \cos\phi)(1 - \beta) \quad (2.7)$$

$$\beta = \sqrt{0.5(1 + \cos\phi)} \quad (2.8)$$

donde:

ϕ =es el ángulo de inclinación de la superficie

Transferencia de calor por fuentes antropogénicas, Q_A .

El calor emitido por fuentes antropogénicas esta principalmente relacionado con los sistemas de transporte, equipos de aire acondicionado, personas y diversas fuentes de calor tanto estacionarias como móviles que se encuentran dentro del espacio urbano. Un estudio realizado por Escourrou et al. (1991), ha concluido que el calor antropogénico de la ciudad de Nueva York es casi el doble del calor recibido por radiación solar; mientras que Pares et al. (1985) han mencionado que el calor antropogénico de la ciudad de Barcelona es equivalente a la quinta parte del calor recibido por radiación solar. La estimación del calor antropogénico ha sido discutida por diversos autores y en algunos puntos existen divergencias.

Narumi et al. (2009), han modelado el calor antropogénico como la suma de la generación de calor de transporte, industria y edificios. En su estudio han registrado los valores promedio de calor antropogenico residual para el mes de agosto (1995-1999) en la ciudad de Osaka, Japon. Han estimado que el flujo de

calor sensible residual para los sectores industrial, residencial-comercial, y transporte oscila entre 35 W/m^2 , $2\text{-}20 \text{ W/m}^2$, $5\text{-}20 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Por otra parte el flujo de calor latente residual para los sectores industrial, residencial-comercial, y transporte oscila entre 10 W/m^2 , $0\text{-}2 \text{ W/m}^2$, $5\text{-}30 \text{ W/m}^2$, respectivamente. (Figura 2.8).

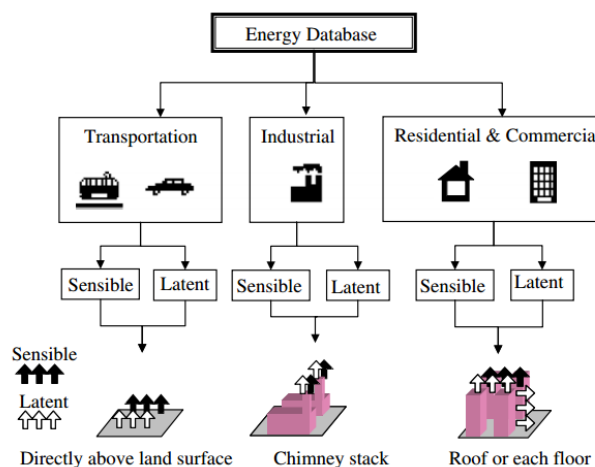


Figura 2.8 Origen del calor antropogénico en la ciudad de Osaka, valores promedio de agosto 1995-1999 (Narumi et al. 2009).

De acuerdo con Oke (1978), es posible relacionar la densidad de población con el consumo per cápita de energía y menciona que el valor promedio anual para una ciudad está entre 15 y 50 W/m^2 . Mientras que el estudio realizado por Hostler et al. (1977), estima que el calor antropogénico en las principales ciudades de EEUU oscila con valores comprendidos desde 20 a 40 W/m^2 para verano a valores de 70 a 210 W/m^2 para invierno. Por otra parte Escourrou et al. (1991), han indicado que los sistemas de calefacción e iluminación liberan energía térmica a razón de 1.2 W/m^2 y el metabolismo de las personas produce cerca de 0.5 W/m^2 .

Flujo de calor por convección, $Q_h = Q_{hs} + Q_{hl}$.

En las zonas urbanas se produce un incremento de calor sensible por convección relacionada con la velocidad del viento y con las propiedades superficiales de los materiales constructivos. Aunque probablemente el calor latente (Q_{hl}) por convección sea bajo en zonas urbanas con poca vegetación, este podría aumentar cuando la ciudad tiene abundantes zonas con vegetación (Sucking et al., 1980).

Flujo de calor turbulento sensible por convección, Q_{hs} .

El flujo de calor turbulento por convección Q_{hs} en zonas urbanas esta dado por Cole et al. (1977) como:

$$Q_{hs} = h_c A (T_{\text{surf}} - T_{\text{aire}}) \quad (2.9)$$

donde:

h_c =Coeficiente de convección

A= área de la superficie

T_{surf} =Temperatura superficie

T_{aire} =Temperatura del aire

El coeficiente de convección ha sido ampliamente estudiado y existen varios métodos para calcularlo. A continuación se presenta uno de los algoritmos utilizados por la herramienta de simulación Energy Plus®:

$$h_c = D + EV_z + FV_z^2 \quad (2.10)$$

donde:

D, E, F = son coeficientes de rugosidad del material (Tabla 2.1)

V_z = velocidad del viento

<i>Índice de rugosidad</i>	<i>Material</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Muy rugoso	Estuco	11.58	5.894	0
Rugoso	Ladrillo	12.49	4.065	0.028
Medio rugoso	Hormigón	10.79	4.192	0
Medio suave	Madera	8.23	4	-0.057
Suave	Yeso	10.22	3.1	0
Muy suave	Vidrio	8.23	3.33	-0.036

Tabla 2.1 Coeficientes de rugosidad publicados en el ASHRAE, Handbook of fundamentals (2001).

Velocidad de viento V_z .

Es un resultado experimental que la velocidad del viento U_H aumenta con la altura H sobre el nivel del suelo (Figura 2.9). Tanto el perfil de la velocidad como la intensidad de la turbulencia tienen una fuerte influencia en los patrones de flujo alrededor de las urbanizaciones.

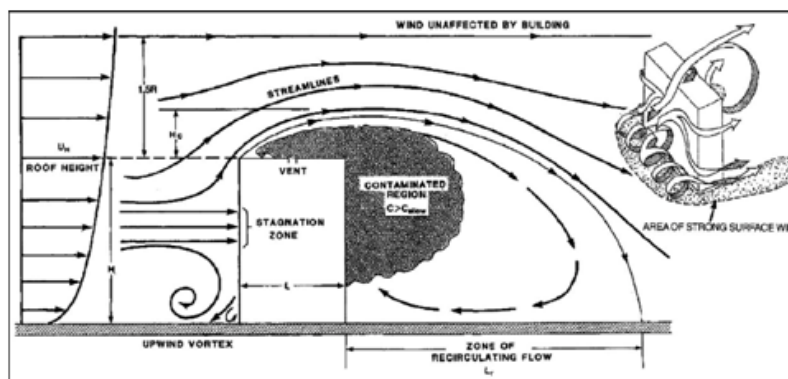


Figura 2.9 Flujo del viento a través de un edificio (ASHRAE, Handbook of fundamentals 2001).

Para calcular la velocidad promedio del viento U_H en función de la altura H , es posible utilizar la siguiente ecuación (ASHRAE, 2001).

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2.11)$$

V_{met} es la velocidad del viento obtenido para la altura de H_{met} de 10 metros sobre el nivel del suelo. Según la tabla del ASHRAE, el tipo de terreno se representa por el exponente α de acuerdo con la tabla 2.2.

Categoría	Descripción	Exponente α	Espesor capa límite δ [m]
1	Centro de ciudad, en la cual al menos 50% de los edificios son mayores de 21 m, sobre una distancia de al menos 2.000 m o 10 veces la altura del edificio de mayor altura.	0,33	460
2	Ciudad con diversos edificios espaciados de altura inferior a 21 m, sobre una distancia de al menos 2.000 m o 10 veces la altura del edificio de mayor altura.	0,22	370
3	Terreno abierto con pequeños obstáculos y conjunto de edificios menores a los 10 m.	0,14	270
4	Edificio menor a los 10 m de altura sin ningún tipo de obstáculo.	0,1	210

Tabla 2.2 Influencia en metros de la capa límite de acuerdo al tipo de terreno (ASHRAE, Handbook of fundamentals 2001).

El exponente α indica el grado de la fricción del viento con el terreno. La variable δ es el espesor de la capa límite atmosférica. La ecuación 2.11 se puede simplificar la siguiente manera:

$$V_z = V_{met} \left(\frac{H}{\delta} \right)^\alpha \quad (2.12)$$

Calor sensible almacenado, Q_s .

Debido a la gran diversidad de cerramientos en una urbanización estimar el calor sensible almacenado es una labor casi imposible (Christen et al., 2004). Sin embargo este término debe ser considerado como un residual de la ecuación de Nuñez, 1977 (Ecuación 2.1).

Para determinar las pérdidas en los cerramientos, se aplica la Ley de Fourier de la conducción para las distintas capas discretas de cada cerramiento.

$$Q_s = -kA \frac{dT_z}{dx} \quad (2.13)$$

Flujo de calor por advección, Q_{AD} .

El flujo de calor por advección se da por el transporte una masa de aire producido por el campo de velocidades de la atmósfera. Por lo general este término meteorológico es referido al transporte de propiedades como temperatura, presión y humedad. Estudios realizados por Santamouris et al. (2001) han determinado que este término puede ser ignorado cuando se estudian centros urbanos pero deben ser considerados cuando se analizan un entornos rurales.

2.2.1.2 Balance energético sobre superficies verdes de baja altura.

El balance de energía para vegetación de baja altura descrito por Deardorff et al. (1978) analiza las relaciones de intercambio de energía entre la atmosfera y la vegetación, como las relaciones de intercambio de energía entre la vegetación y el suelo (Figura 2.10).

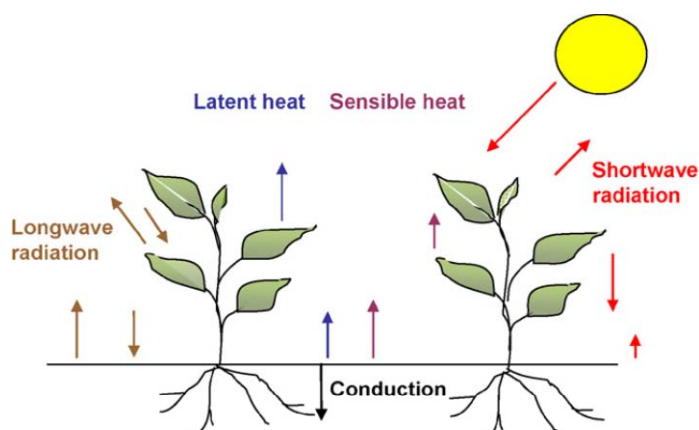


Figura 2.10 Balance energético sobre superficies verdes de baja altura.

Balance de energía entre la vegetación y la atmosfera:

$$F_f = 0 = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 - P_f] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (2.14)$$

donde:

σ_f = porcentaje de vegetación sobre terreno

α_f = albedo de las hojas

I_s = radiación solar recibida (W/m²)

I_{ir} = radiación infrarroja recibida (W/m²)

T_f = temperatura de la vegetación

T_g = temperatura del suelo

ε_g = emisividad del suelo

ε_f = emisividad de la vegetación

$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g$

σ = constante de Stefan-Boltzman (5.6998 x 10⁻⁸ W/m² K)

H_f = calor sensible vegetación-atmosfera (W/m²)

L_f = calor latente vegetación-atmosfera (W/m²)

P_f = transferencia de calor por precipitación (W/m²)

Esto se puede resumir como la suma de los términos de transferencia de calor F_f , consistentes en la radiación solar visible y la radiación infrarroja recibida, la radiación de onda larga emitida, la energía correspondiente al calor sensible, al calor latente, y la transferencia de calor por precipitación.

Balance de energía Vegetación- Terreno.

El balance de energía entre la vegetación y el terreno contiene dos nuevas variables; la temperatura de la vegetación T_f , y la temperatura del terreno T_g . (Deardorff, 1978)

$$F(T_g) = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - P_g - \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + \kappa \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (2.15)$$

donde:

$(1 - \sigma_f)$ = radiación y precipitación no interceptada por la vegetación

α_g = albedo del suelo

I_s = radiación solar recibida (W/m²)

I_{ir} = radiación infrarroja recibida (W/m²)

T_g = temperatura del suelo

T_f = temperatura de la vegetación

ε_g = emisividad del suelo

ε_f = emisividad de la vegetación

$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g$

σ = constante de Stefan-Boltzman ($5.6998 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$)

H_g = calor sensible vegetación-terreno (W/m^2)

L_g = calor latente vegetación-terreno (W/m^2)

P_g = transferencia de calor por precipitación (W/m^2)

κ = conductividad térmica del suelo (W/m K)

Los valores de α_g y ε_g están en función de las propiedades del suelo y se encuentran en un rango de 0.23 a 0.40 y 0.92 a 0.97, respectivamente, el valor κ es la conductividad del suelo sobre la superficie.

2.2.2 Modelos numéricos

El fenómeno de ICU es un problema complejo donde se presentan un gran número de variables controlables y variables incontrolables. Por lo tanto es peligroso asumir un modelado mediante modelos analíticos pues además de que se deben incluir un gran número de variables hay que considerar que algunas de estas variables tienen un carácter fuertemente transitorio. Por ello, diversos autores han desarrollado programas numéricos capaces de resolver todas las ecuaciones involucradas en el balance de energía en ciudades y posteriormente han extrapolado sus resultados al estudio ICU.

Entre los modelos existentes, Taha et al. (1997) han medido y tabulado el incremento de temperatura en Grados Día de calefacción¹⁰ y Grados Día de refrigeración¹¹ debido a las urbanizaciones. En su estudio han utilizado como referencia la temperatura de los aeropuertos y las ha contrastado con la temperatura de los centros urbanos.

Akinaru et al. (1996) han propuesto utilizar un índice urbano llamado "Heat Island Potencial". Este índice relaciona la temperatura de las superficies urbanas con la temperatura urbana. Sus resultados han sido verificados con medición experimental y con bases de datos existentes en sistemas de información geográfica (SIG).

Lemonsu et al. (2002), han desarrollado un modelo numérico para determinar el efecto ICU sobre la ciudad de Paris (en temporada de verano) y han reportaron que los edificios son los principales causantes del efecto ICU.

¹⁰ Grados Día de Calefacción: Es un indicador del grado de rigurosidad climática de un sitio ya que relaciona la temperatura media con una cierta temperatura de confort para calefacción.

¹¹ Grados Día de Calefacción: Es un indicador del grado de rigurosidad climática de un sitio ya que relaciona la temperatura media con una cierta temperatura de confort para refrigeración.

Arnfield et al. (1998), han usado modelos numéricos para simular cañones urbanos y determinaron que tanto la altura y la separación entre edificios, como los materiales de las superficies urbanas contribuyen en las fluctuaciones de la temperatura urbana.

Ashie et al. (1999), han realizado el balance energético sobre un edificio y su entorno, su modelo reporta que los equipos de aire acondicionado elevan en promedio 1º C a 2º C la temperatura global del edificio.

Por otra parte Yamda et al. (2000) ha propuesto un modelo numérico alternativo que considera el albedo, la rugosidad, el calor antropogénico y la cantidad de humedad de terreno como las variables a considerar para simular el calor sensible y el calor latente en el entorno urbano.

Blocken et al. (2009) han simulado el efecto de la velocidad del viento sobre los edificios y han estimado los distintos coeficientes de convección sobre los edificios. En sus conclusiones establecen que estos coeficientes dependen de la tipología y de la ubicación del edificio en el entorno urbano. Como herramienta de cálculo han utilizado la simulación CFD (Computer Fluid Dynamics), y posteriormente han validado sus resultados en un túnel de viento.

También existen modelos que relacionan el efecto ICU con el ahorro de energía en edificios; Akbari et al. (2005), han realizado un compendio de tablas donde relacionan la temperatura urbana con la demanda energética de los edificios. Han iniciado simulado el comportamiento energético de un edificio con alta influencia en el efecto ICU y seguidamente han contrastado la simulación energética del edificio con una baja influencia en el efecto ICU.

Sailor et al. (2007), han desarrollado el programa de consulta web MIST (Mitigation Impact Screening Tool) para determinar el fenómeno de isla de calor para 170 ciudades de EEUU extrapolando resultados de 20 ciudades simuladas numéricamente. Los resultados proporcionados por el programa MIST permiten a Sailor et al. (2007) concluir que existe un aumento de la demanda de energía en edificios en climas urbanos severos.

2.2.3 Modelado de Mapas del Clima Urbano.

Los mapas del clima urbano son herramientas de información y evaluación que integran factores climáticos y consideraciones de planificación en una representación espacial bidimensional con el objetivo de representar el clima urbano y sus problemáticas. (Baumüller et al., 1992; VDI, 1997; Scherer et al., 1999). De acuerdo con Ren et al. (2010), para elaborar este tipo de mapas es necesario realizar en primer lugar un Mapa Analítico del Clima Urbano donde se visualizan las características climáticas, geofísicas y espaciales del entorno urbano. Una vez compilada la información en el Mapa Analítico del Clima Urbano, el próximo paso será encontrar mejoras de ordenación y planeación del territorio en un Mapa de Recomendación del Clima Urbano donde se incluyen instrucciones de planificación urbana.

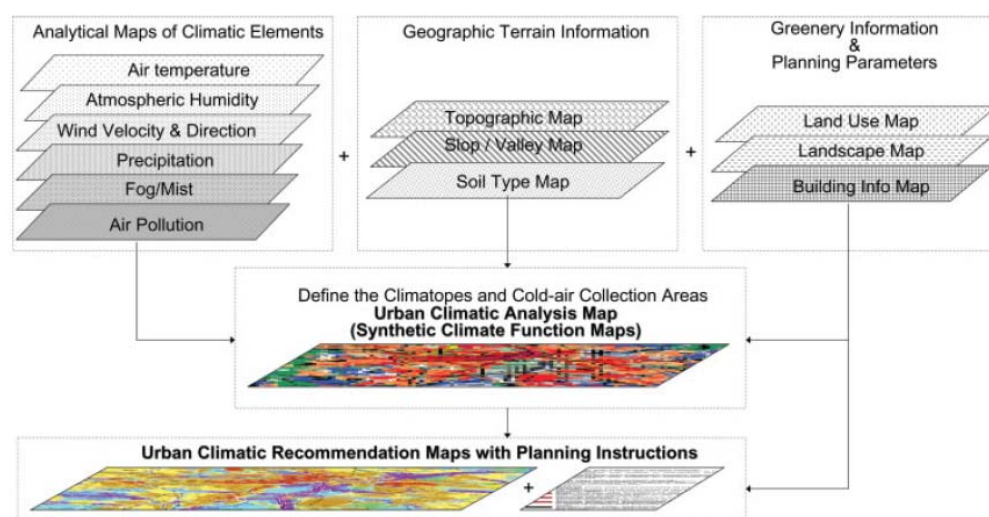


Figura 2.11 Estructura de un Mapa Analítico de Clima Urbano y de un Mapa de Recomendación Urbana (Ng et al., 2009).

2.2.3.1 Mapas Analíticos del Clima Urbano.

De acuerdo con la revisión bibliográfica que ha realizado Ren et al. (2010), la mayoría de estudios que han realizado Mapas Analíticos del Clima Urbano aglutinan la información en un mapa único, definen categorías del clima urbano de manera cualitativa y la ponderación de cada una de las variables que conforma el Mapa Analítico del Clima Urbano es subjetiva. Por ejemplo, el atlas climático de la ciudad de Stuttgart, presenta 11 categorías de clima urbano, incluyendo categorías tan diversas como superficies de agua, suelo desnudo, parques, bosques, suburbios, zonas industriales, zonas residenciales, centro urbano, entre otras, además de incluir sobre el Mapa Analítico del Clima Urbano los patrones predominantes del viento sobre la ciudad (Figura 2.12).

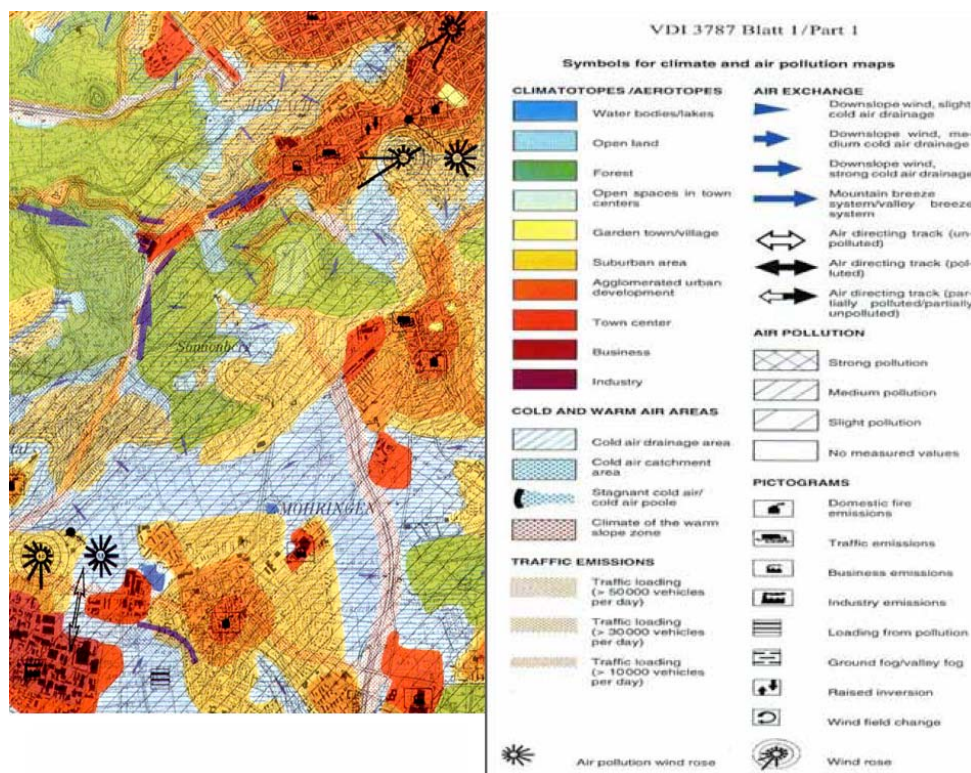


Figura 2.12 Mapa Analítico del Clima Urbano para la ciudad de Stuttgart, Alemania (Climate Atlas, 1992)

En menor medida, se han realizado Mapas Analíticos del Clima Urbano de manera cuantitativa. Por ejemplo, Moriyama et al. (1999), han utilizado el satélite LANDSAT TM para extraer información como albedo, evapotranspiración y NDVI, y junto con otras variables urbanas han realizado en un Mapa Analítico por categorías de uso de suelo, para posteriormente aplicar un balance de energía para estimar la temperatura del aire para cada una de dichas categorías. Otro estudio ha sido realizado por Ng et al. (2009). En su trabajo han desarrollado modelos para estimar un Mapa Analítico del Clima Urbano considerando un mapa del comportamiento térmico urbano y a un mapa de potencial dinámico de la ventilación. Lo interesante del estudio estriba en que ambos mapas han sido obtenidos de manera cuantitativa, han utilizando una resolución de 100 metros/pixel, y cuando era necesario, se realizaba la correspondiente transformación de una capa de información vectorial a una capa de información raster. El mapa térmico lo han obtenido con las capas de información: Volumen edificios, Topografía, y espacios verdes; y el mapa de potencial dinámico lo han obtenido con las capas: cobertura urbana, espacios naturales, y proximidad a fuentes propicias de ventilación (proximidad a ríos, pendientes topográficas, entre otros). Finalmente, cada una de las capas de información las han normalizado asignándoles un valor de impacto, de nulo o poco influyente a altamente influyente. El hecho de normalizar la información les ha permitido sumar todas las capas asociadas para generar un Mapa Analítico del Clima Urbano que muestra

por categorías las zonas con fuerte impacto en el confort térmico y las zonas con moderado confort térmico (Figura 2.13).

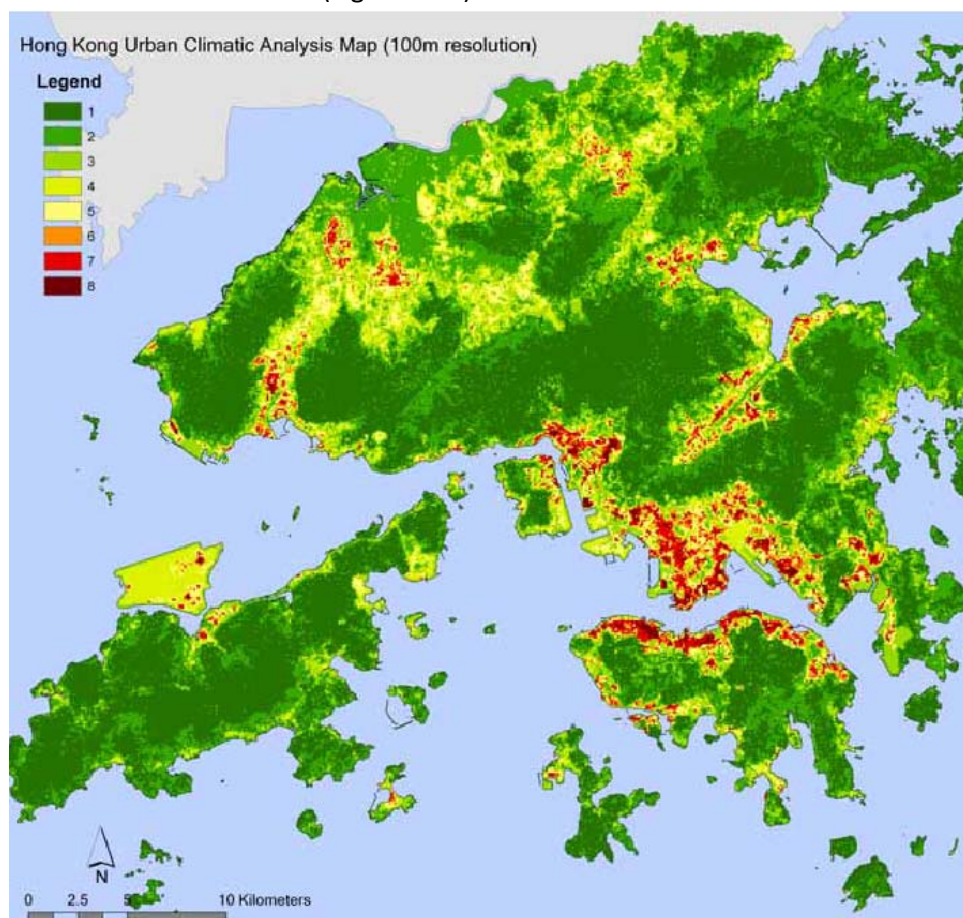


Figura 2.13 Mapa de Análisis del Clima Urbano, Hong Kong (Ng et al., 2009).

De acuerdo a Katzchner et al. (1998), existen tres aspectos que se pueden distinguir en un mapa analítico del clima urbano. El primero de ellos, es el estudio del viento, se centra en la captura y canalización de patrones de circulación del aire local, en establecer zonas de ventilación y en localizar edificios y vegetación que influyan en los patrones de viento. El segundo aspecto, el térmico, se centra en analizar el efecto ICU y las variaciones bioclimáticas en el entorno urbano, especialmente en áreas con alto estrés por frío o calor. El tercero se centra en la determinación de áreas donde el aire se encuentra altamente contaminado. Finalmente Katzchner et al. (1998), concluyen que la comprensión y análisis de las capas de información que conforman un Mapa Analítico del Clima Urbano permite entender que la distribución espacial de distintos climas urbanos es producto de la interacción de variables climáticas y su relación con la forma y el espacio urbano.

2.2.3.2 Mapas de Recomendación del Clima Urbano.

Una vez finalizado el correspondiente Mapa Analítico del Clima Urbano, los Mapas de Recomendación del Clima Urbano muestran el plan de acción a desarrollar para mitigar el clima urbano.

Generalmente los Mapas de Recomendación del Clima Urbano muestran categorías que van de “Zonas que requieren mejora” a “Zonas que deben ser conservadas”. (Baumüller et al., 1992). Si bien, los Mapas de Recomendación del Clima Urbano muestran con claridad los límites de las distintas zonas de actuación, no tiene sentido reconocer estos límites exactamente como son presentados y se debe considerar una tolerancia entre 50 y 100 metros entre límites (Figura 2.14).

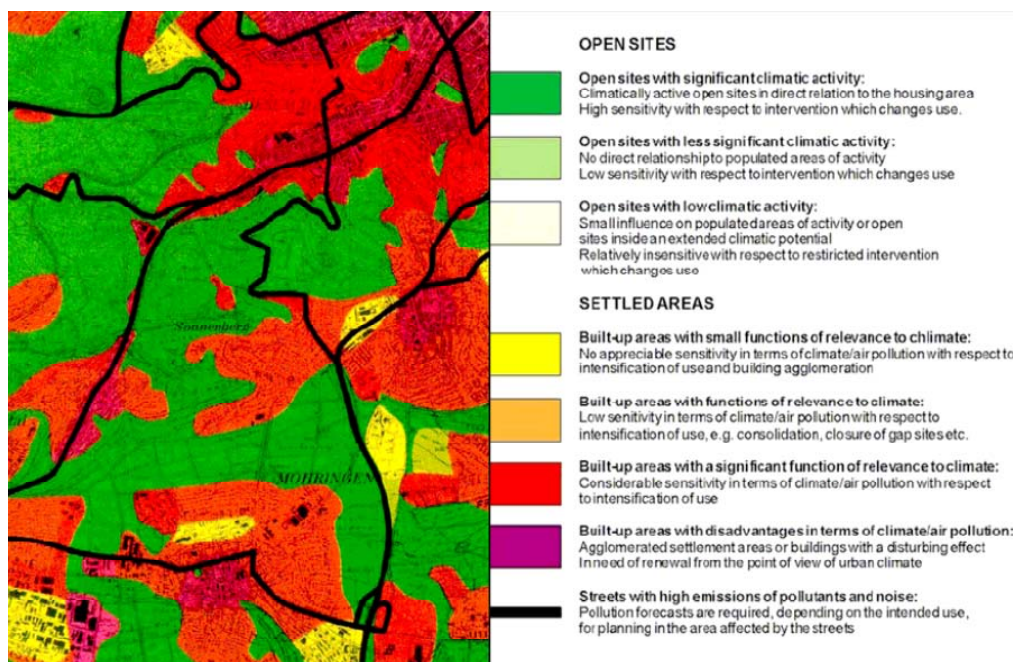


Figura 2.14 Mapa de recomendación urbana para la ciudad de Stuttgart (Climate Atlas, 1992).

2.3 Mitigación del efecto de la isla de calor urbana.

El clima urbano severo es ocasionado en mayor medida por factores urbanos y en menor medida por las condiciones meteorológicas (Cuadrat et al., 2002). En este sentido diversos estudios han investigado ampliamente las medidas de mitigación del efecto de isla de calor urbana y sus beneficios energéticos, ambientales y económicos.

Las medidas de mitigación del clima urbano se enfocan en proceder mediante tres grupos de actuación:

- Reducción de las temperaturas superficiales mediante el uso de materiales adecuados al entorno urbano y a la edificación.
- Incremento de zonas verdes en el entorno urbano.
- Planeamiento urbano que contemple la mitigación como una prioridad

2.3.1 Materiales adecuados en el entorno urbano y en la edificación.

Las propiedades de los materiales que conforman las superficies edificadas determinan en gran medida el clima urbano. En particular, las características ópticas de los materiales usados en el entorno urbano como el albedo y la emisividad tienen un impacto importante en el balance de energía urbano (Santamauris, 2001). El uso de materiales con alto albedo puede ser aplicado tanto en pavimentos como en cubiertas reflejantes sobre los edificios.

2.3.1.1 Reducción de albedo en pavimentos.

Las zonas urbanas están caracterizadas por relativamente bajos albedos como resultado de edificios oscuros y superficies urbanas que absorben radiación solar, encontrándose en las ciudades europeas albedos entre 0.15 - 0.30 (Oguntoyinbo, 1986). Asaeda et al. (1996), han probado el impacto de distintos pavimentos comúnmente usados en ciudades y han encontrado que el asfalto incrementa notablemente la temperatura superficial y almacena más calor comparado con pavimentos de hormigón. Berget et al. (1978), mencionan que pintar los pavimentos de blanco con albedos cercanos a 0.55 iguala la temperatura superficial del pavimento a la temperatura urbana, mientras que dejar de pintar los pavimentos reduce el albedo a 0.15 y puede llegar a producir una diferencia de temperaturas cercana a los 11°C. Taha et al. (1992), han medido el albedo para distintas superficies y encontraron una diferencia de 4 a 8°C en la temperatura superficial entre un material blanco con albedo 0.72 y un material negro con albedo 0.08.

2.3.1.2 Cubiertas reflejantes.

Un incremento del albedo superficial en los edificios impacta directamente en su balance de energía. En este sentido numerosos estudios han demostrado los beneficios de usar cubiertas reflejantes en la reducción del efecto de isla de calor. En todos los casos de estudio, la temperatura de la cubierta se reduce significativamente usando pinturas con alto albedo.

Simpson et al. (1997), han encontrado que cubiertas de color blanco (albedo=0.75) son más frescas de cubiertas color gris (albedo=0.30). Sus medidas advierten que el incremento del albedo puede no ser efectivo en la reducción de temperatura si es reducida la emisividad del material reflejante.

Los recubrimientos en cubiertas para mitigar el efecto ICU pueden ser de color blanco o de color metálico (aluminio). Los recubrimientos de color blanco deben de incluir una capa de materiales poliméricos, como el acrílico ó oxido de zinc, a manera de ser una cubierta reflectiva. Los recubrimientos de color metálico consisten en una fina capa de asfalto con un recubrimiento fino de aluminio para proteger al asfalto de la radiación ultravioleta. El incremento en la reflectividad de este tipo de recubrimiento es bastante significativo sin embargo tienen una baja emisividad infrarroja (Lawrence Berkeley Laboratory, 1998).

La mayoría de las cubiertas metálicas, de acero o aluminio, se caracterizan por tener unas reflectividades altas (0.6-0.7) y valores de emisividad bajos (0.25); las propiedades ópticas del hormigón y de las tejas se caracterizan por tener baja reflectividad (0.15-0.3) y alta emisividad (0.9).

En la tabla 2.3 se muestran valores típicos para distintos tipos de cubiertas reflejantes:

<i>Producto</i>	<i>Reflectancia</i>	<i>Emisividad</i>
Recubrimiento blanco (1143µm)	0.82	0.91
Recubrimiento blanco (686µm)	0.8	0.91
Recubrimiento blanco (7.54µm)	0.78	0.91
Recubrimiento aluminio	0.61	0.25
Cubierta acero galvanizado	0.61	0.04
Teja roja	0.33	0.9
Hormigón	0.25	0.9

Tabla 2.3 Reflectancia y emisividad de distintos tipos de cubiertas reflejantes (Lawrence Berkeley Laboratory, 1998).

Finalmente, se puede mencionar que existen diversas técnicas para mantener las cubiertas a un nivel adecuado de temperatura; por ejemplo Jain et al. (1974), han

instalado aspersores de agua sobre la cubierta y observaron una reducción de la temperatura entre 13°C a 17°C.

2.3.2 Zonas verdes en el entorno urbano y en la edificación.

Las zonas verdes tienen beneficios ecológicos y psicológicos en la sociedad y contribuyen significativamente a la mitigación del efecto de la isla de calor. En el balance energético sobre zonas verdes las hojas de árboles y plantas interactúan con el medio ambiente mediante un intercambio de energía; dominada por la radiación solar y la radiación reflejada (albedo), por el calor sensible y por el calor latente (evaporación) de las plantas. Además las zonas verdes interactúan con el medio ambiente con un intercambio de masa cuando se presenta el fenómeno de evapotranspiración y al llevarse a cabo la fotosíntesis.

La evapotranspiración está definida como la pérdida de agua de las plantas y árboles hacia la atmósfera debido a la evaporación y a la transpiración. La evaporación es el proceso en el cual el líquido se transforma en gas. En la atmósfera, el agua se convierte en vapor de agua. La transpiración es el proceso en el cual el agua que poseen las plantas es transferida en vapor de agua a la atmósfera. En este sentido la transferencia de calor latente, de las plantas a la atmósfera, es aproximadamente de 2324 kJ por kilogramo de agua evaporada (Montgomery, 1987) y se puede considerar que cada árbol evapora 1460 kilogramos de agua en un día típico de verano (Moffat et al., 1981).

El estudio realizado por Sailor et al. (1994), han considerado que la variable más significativa en el efecto ICU es la vegetación y han determinado que los parques crean un “efecto oasis” capaces de reducir la temperatura de 1 °C a 5 °C durante la noche; Taha et al. (1991), han simulado numéricamente el “efecto oasis” y han encontrado diferencias de 2° C a 8 °C con respecto al entorno urbano; Duckworth et al. (1954), han encontrado una diferencia de temperatura de 8°C entre parques con altos niveles de vegetación y la periferia urbana de San Francisco, USA; Lindqvist et al. (1992), han reportado un gradiente de temperatura de 0.3 °C - 0.4 °C por cada 100 metros hacia el interior de un parque con alta vegetación; Gao et al. (1993), han simulado el uso de árboles sobre las calles y han detectado una reducción de la temperatura del aire cercana a los 2 °C.

2.3.2.1 Sombreamiento en edificios.

El uso adecuado de vegetación en el entorno de los edificios puede ser muy significativo en el impacto de la temperatura urbana. McPherson et al. (1989), han comparado el comportamiento térmico de un edificio rodeado con césped y vegetación con un edificio rodeado por grava sin ningún tipo de vegetación. Sus resultados han demostrado que la temperatura superficial del césped al mediodía es hasta 15°C inferior a la superficie de grava. En su estudio concluyen que los

edificios rodeados por grava sin ningún tipo vegetación consumen 20-30% más energía en refrigeración que los edificios rodeados por césped y vegetación.

El impacto de los árboles además de contribuir en la mitigación del efecto ICU han demostrado ser mecanismos de ahorro energético los edificios. Akbari et al. (1992), han simulado los efectos del sombreado en un edificio, en su investigación han concluido que un árbol con aproximadamente 8 metros de follaje, puede reducir la demanda de refrigeración de un 2% a un 10%.

2.3.2.2 Cubiertas verdes.

Las cubiertas verdes consisten en el tratamiento técnico de cubiertas edificadas mediante el cual se incorporan capas de vegetación especialmente adaptadas a las condiciones físicas y climáticas del sitio. Este tipo de técnicas se ha vuelto popular en los últimos años debido a su amplia gama de beneficios ambientales.

Entre los beneficios de las cubiertas verdes se encuentra la recolección y el aprovechamiento del agua de lluvia; una mejora de la calidad del aire y un impacto en la temperatura del aire. Adicionalmente brinda beneficios estéticos y da la posibilidad de crear huertos ecológicos. La instalación de cubiertas verdes no solo contribuye en la reducción de la carga térmica de los edificios sino también en una forma de mitigar el efecto de isla de calor en urbanizaciones (Sailor et al.,2004).

Un estudio realizado por Onmura et al. 2001, ha determinado que en un edificio con cubierta verde, la temperatura en de plantas es de 4 a 5 °C menor a la temperatura ambiente; Kunmar et al. (2005), han establecido que en el interior de un edificio con cubierta verde es posible mantener la temperatura de confort sin necesidad de aire acondicionado; García et al. (2009), han reportado que la combinación de cubiertas verdes con cubiertas reflejantes reduce en mayor medida la temperatura superficial de las cubiertas en edificios.

2.3.3 Reducción del calor antropogénico.

El efecto de isla calor urbana está asociada a la alteración de la naturaleza por el medio urbano y a la actividad humana; ya sea por edificios, transporte o industria (Nauromi et al.,2009). De acuerdo con Shimoda et al. (1999), el calor antropogénico es una imperfección en el sistema energético de metabolismo urbano. Aunque es difícil estimar el intercambio de calor por fuentes antropogénicas debido a la temporalidad, posición, cantidad, y fase de las fuentes y sumideros resulta siempre posible mitigar estas fuentes de calor.

En lo concerniente al sector residencial y sector terciario, un estudio realizado por Kikegawa et al. (2003), ha demostrado que apagar el aire acondicionado de los edificios podría reducir la temperatura urbana de 1°C a 2°C. En el sector transporte, estimar el calor sensible y el calor latente es una labor compleja debido a que es imposible determinar cuánto tiempo, en qué momento y que

cantidad de medios de transporte se están desplazando por una zona urbana. Por lo que existen diversos autores que proponen discretizar la cantidad de calor por unidad de área [W/m^2] (Oke, 1978; Hostler, 1977). Por otro lado Narumi et al. (2009), proponen relacionar la cantidad de calor producido por el transporte y por la industria con la cantidad de emisiones emitidas. El estudio realizado por Rosenfeld et al. (1998), revela que con niveles de ozono cercanos a 120 ppb (partículas por billón) se registraron temperaturas cercanas a los 22°C y cuando los niveles de ozono alcanzaron las 240 ppbv de registraron temperaturas cercanas a los 32°C.

2.3.4 Factores de diseño urbano.

Existen ciertas medidas de mitigación del efecto de isla de calor urbana que solo pueden ser aplicadas mediante un adecuado diseño urbano y un correcto proyecto arquitectónico. Por lo tanto estas medidas solo se pueden aplicar en la fase de planificación y construcción de nuevas urbanizaciones.

2.3.4.1 Compacidad urbana.

La compacidad espacial de las ciudades, expresada en las proporciones geométricas de sus calles y de sus edificios, influyen en la determinación las características térmicas urbanas. En términos generales una alta compacidad está asociada con una alta densidad urbana.

La alta concentración de edificios deriva en una reducción de la penetración solar, además de resultar en una “trampa” de radiación de onda larga, pues la radiación incidente en los edificios posteriormente se liberará como calor. Urano et al. (1999) han simulado el comportamiento térmico en tres dimensiones de una urbanización y han reportado que los edificios amplios y de baja altura liberan energía de modo más conveniente que edificios de menor superficie y de mayor altura. En otro trabajo, Eliasson et al. (1996) han vinculado la temperatura urbana con la geometría de las calles y la configuración urbana.

2.3.4.2 Factor de visión del cielo.

El factor de visión del cielo es un buen indicador de la densidad de población. Estrictamente hablando existe un factor de visión bajo donde la densidad de población es alta (Oke, 1978). Durante un día despejado un factor de visión del cielo alto significa el incremento del efecto ICU; durante una noche despejada de verano un factor de visión alto significa un decremento del efecto de la isla de calor. En una noche con nubes o contaminación el incremento del factor de visión del cielo incrementa el efecto ICU, este fenómeno se presenta porque la radiación de onda larga es incapaz de escapar a la atmosfera (Giridharan et al. 2004)

2.3.4.3 Cañón urbano.

Oke (1978) también ha propuesto otro factor urbano relacionando con la altura de los edificios y el ancho de las calles (H/W), definido como “cañón urbano”. La

radiación solar incidente es absorbida por las superficies de las fachadas y solo una pequeña parte es aprovechada por el suelo, posteriormente esta radiación es emitida en radiación de onda larga al cielo. Una baja relación H/W permite mayor captación de radiación directa y facilita la ventilación sobre el cañón urbano; una alta relación H/W emite una mayor cantidad de radiación de onda larga y disminuye el efecto convectivo sobre el cañón urbano.

Santamauris (2001) ha medido la temperatura para distintos cañones urbanos con el objetivo de determinar su comportamiento térmico. Su estudio ha determinado que una baja relación $H/W < 1$ incrementa la temperatura urbana de 0 °C a 4 °C; en contraste una alta relación de aspecto H/W, puede significar un aumento de la temperatura urbana de 6°C a 7°C.

CAPÍTULO 3. EXTRACCIÓN DE VARIABLES PARA DETERMINAR EL EFECTO DE ISLA DE CALOR URBANA.

Abstract.

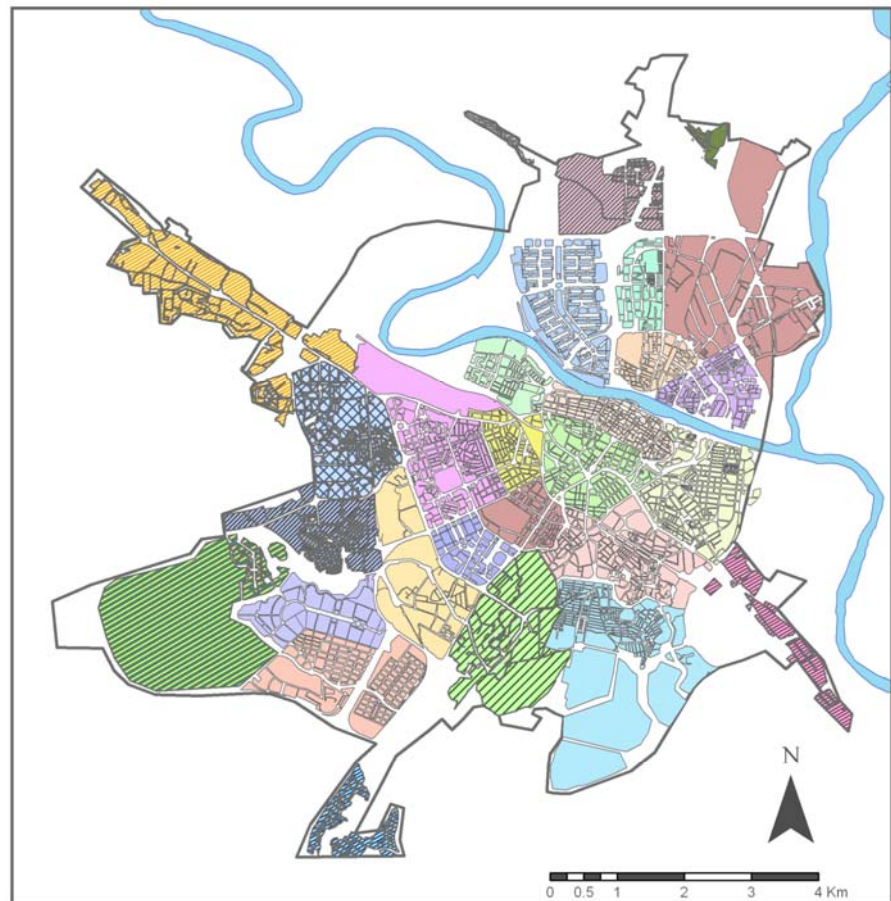
This chapter deals with the extraction of a series of physical and geospatial variables in order to evaluate Zaragoza city urban climate. First of all, a series of necessary conditions for carrying out the data analysis as a whole (study zone, projection, cell resolution, spatial sizing). Next, the use of satellite images as physical variables extraction tool affecting UHI effect is analyzed, emphasizing on Land Surface Temperature (LST) and urban vegetation evaluation. Last, vectorial information of urban environment is extracted by means of Geographical Information Systems for a later transformation into "raster" type information.

Una vez comprendidos los conceptos generación, determinación y mitigación de la isla de calor urbana (ICU), el siguiente paso es realizar el modelado del efecto ICU. Analizar la ICU mediante el balance de energía planteado por Oke (1978) es complejo debido a que la morfología de los edificios es un factor de micro escala en comparación con el medio urbano. Por otra, analizar la ICU mediante modelos numéricos es limitado a un pequeño número de ciudades con estudios previos además presentan la carencia de no poseer información a escala interurbana. Además, ambos modelos tienen la desventaja de ser sumamente analíticos y requieren realizar un amplio número de consideraciones teóricas, tantas que el resultado obtenido puede diferir de la realidad. Razón por la cual es atractivo desarrollar modelos que consideren la interrelación del medio físico (superficie terrestre, vegetación, o clima), que dejen de lado los modelos analíticos por modelos que describan la realidad de la zona de estudio, tanto a nivel urbano como interurbano.

En este sentido, los Mapas de Clima Urbano son capaces de describir el efecto de ICU, en el entendido que es posible describir el clima urbano si se comprenden y jerarquizan las principales variables que causan este fenómeno. Para la elaboración del Mapa de Clima Urbano se han aplicado distintas técnicas de extracción de información con la finalidad de obtener un compendio de variables urbanas que explican en gran medida el efecto de la isla de calor urbana. En total se han aplicado tres técnicas diferentes de extracción de datos: la primera de ellas utiliza las tecnologías satelitales para obtener variables como la temperatura superficial terrestre y la cantidad de cubierta vegetal urbana. Posteriormente se ha estudiado la forma y espacio urbano con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG), entre este tipo de variables se encuentran la compacidad de la edificación, la distancia al centro urbano, la distancia a la periferia de la ciudad, entre otras. Por último, se ha extraído información experimental de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del entorno urbano.

3.1 Área de estudio.

El estudio de la isla de calor urbana se ha realizado sobre la ciudad de Zaragoza, España. Una ciudad con un precedente histórico tan importante como Zaragoza engloba características constructivas muy diferentes a lo largo de los años y presenta trazados urbanos que se han ido adecuando al crecimiento de la ciudad con el paso del tiempo. En total Zaragoza se divide en 28 barrios con identidad propia, cada uno con un precedente histórico importante que lo identifica no solo con las características constructivas de sus edificios y la forma del trazado de sus calles, sino por la identidad de la gente que lo habita y sus costumbres. Además Zaragoza posee una gran área verde como lo es el Parque Grande, pulmón de la ciudad, y uno de los principales centros de actividades deportivas y de recreo de la ciudad. En la figura 3.1 se presenta una cartografía de los barrios de Zaragoza, junto con el Parque Grande y el paso del río Ebro a través de la ciudad.



Perimetro urbano	Casablanca	Juslibol	Parque Goya	San José
Actur	Casco	La Jota	Parque Grande	Torrero
Almozara	Centro	Las Fuentes	Parque Roma	Universidad
Arcosur	Cogullada	Miralbueno	Picarral	Valdefierro
Arrabal	Cuarte de Huerva	Montecanal	Romareda	Valdespartera
Cartuja	Delicias	Oliver	San Gregorio	

Figura 3.1 Barrios de Zaragoza, España.

La clasificación de la edificación de acuerdo al tipo de uso del suelo se ha realizado a partir del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), el objetivo de la figura 3.2 es identificar los espacios destinados al sector residencial, comercial, industrial y zonas verdes.

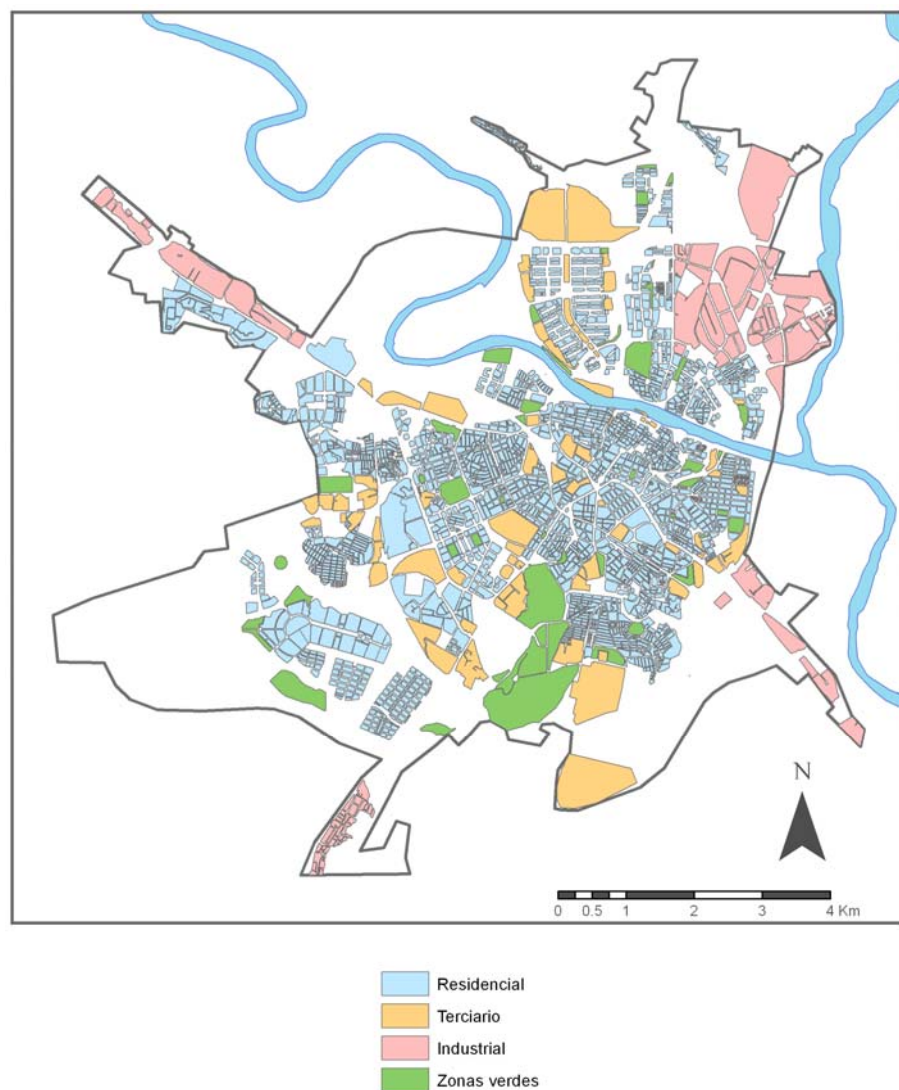


Figura 3.2 Clasificación del uso del suelo en Zaragoza, España.

3.2 Clima de Zaragoza

La región aragonesa presenta variaciones climáticas cuyas características diferenciales dependen básicamente de la altitud. De acuerdo a la descripción ofrecida por Turégano (2008), existen cuatro zonas climáticas, con las consiguientes subdivisiones, que dan lugar a seis zonas representativas del clima de la provincia de Aragón, España.

- Clima de montaña de los Pirineos y de la cordillera Ibérica
- Clima de transición de los Somontanos
- Clima de la Depresión del Ebro
- Clima de tendencia continental en la Depresión Longitudinal Ibérica

La ciudad de Zaragoza se encuentra dentro de la Depresión del Ebro. Responde al clima de una cuenca mediterránea con marcado carácter continental con acusados contrastes térmicos entre verano e invierno. Se encuentra protegida debido al encajonamiento de las montañas, tanto de la humedad oceánica como de las perturbaciones mediterráneas, esta protección motiva su tendencia de aridez y refuerza la continental del viento dominante del noroeste: el cierzo (Figura 3.3).

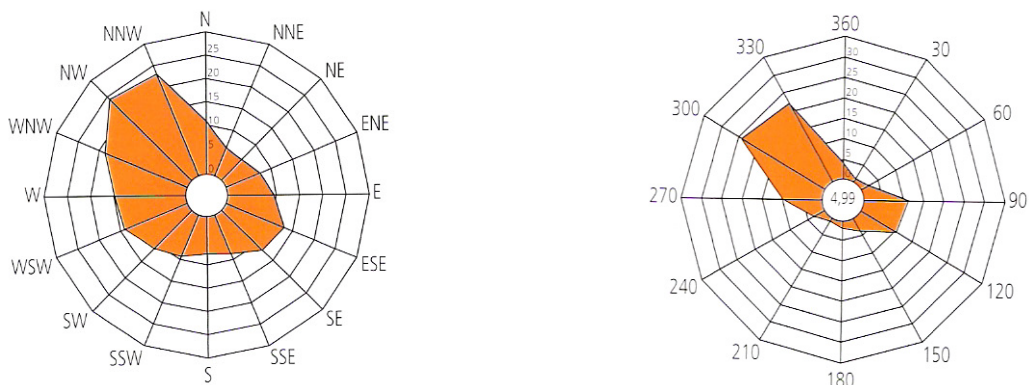


Figura 3.3 a) Rosa de velocidades medias de viento [km/h]; b) Rosa de dirección de vientos [%], Turégano, 2008.

3.3 Preparación de datos.

El trabajar con variables de tan diverso origen hace necesario establecer criterios comunes de sistema de proyección, resolución y dimensionado espacial, pues solo así será posible relacionar la influencia de las variables influyentes en el efecto ICU y su directa relación con puntos en el espacio.

3.3.1 Proyección y sistema de coordenadas.

El primer paso para analizar las variables que en mayor o en menor medida contribuyen al efecto ICU es establecer un mismo sistema de proyección y en un mismo sistema de coordenadas. Una proyección es la manera de representar al planeta Tierra en dos dimensiones, y según el tipo de información que se desea mostrar existen determinadas proyecciones que se adaptan a mejor a unos usos más concretos. En este sentido las capas de información obtenidas con tecnología satelital poseen el sistema de proyección *World Geodetic System 84*. Las capas de información obtenidas con herramientas SIG se adquirieron con el sistema de proyección *European Terrestrial Reference System 1989* y fueron transformadas con modelos matemáticos al sistema proyección *World Geodetic System 84*.

3.3.2 Resolución de celda.

La totalidad de las variables adquiridas para el modelado del efecto ICU han sido almacenadas en capas tipo raster. Los datos raster son imágenes digitales que representan la información en una malla dividida en celdas regulares (Niveles Digitales o píxeles), donde cada celda representa un único valor. Por ejemplo en las variables adquiridas con tecnología satelital, la energía radiante, radiancia, reflectividad, cobertura vegetal y emisividad almacenan la información en una resolución de 30 metros (tamaño de celda); la energía radiante térmica es almacenada en una resolución de 120 metros; y el modelo digital de elevaciones almacena la información de celdas de 25 metros. El primer escollo es almacenar todas las variables adquiridas en una misma resolución, para ello se ha homogenizado todas las imágenes tipo raster a una resolución de 25 metros. De la misma manera, la información vectorial generada tiene que ser transformada a información tipo raster con resolución de 25 metros. La consecuencia de esta transformación será la pérdida de resolución espacial, sin embargo la estructura de los datos será más simple para realizar una comparación entre las diversas capas raster y analizar su relación con el efecto ICU.

3.3.3 Dimensionado espacial.

Además de poseer el mismo sistema de coordenadas y la misma resolución es necesario mantener la misma dimensión espacial en todas las imágenes. En otras palabras, todas las variables deben poseer exactamente el mismo número de celdas y estar localizadas en la misma localización espacial.

Por lo tanto es en este apartado donde se han de definir los límites del estudio del efecto de la isla de calor urbana. Estos límites contemplan el área metropolitana de Zaragoza y su respectiva zona conurbada delimitada en la esquina superior izquierda en la coordenada (X1=668000,Y1=4619070) a la esquina inferior derecha en la coordenada (X2=680000,Y2=4607070), recordando que se ha utilizado el sistema de proyección *World Geodetic System 84* (Figura 3.4).



Figura 3.4 Localización del área de estudio del efecto ICU.

3.4 Datos experimentales de la temperatura urbana.

Tanto la monitorización del clima urbano por transectos urbanos como la obtención de datos por estaciones meteorológicas resultan indispensables para realizar un adecuado análisis del efecto ICU.

El recorrido por transectos urbanos presenta la ventaja de cubrir gran parte de la ciudad, por supuesto, por todos aquellos lugares por los que puede acceder el medio de transporte donde este montado el sensor. La desventaja de este tipo de monitorización es que las medidas carecen de ubicuidad y por lo que es necesario establecer un periodo de tiempo razonable para dar por validas las mediciones realizadas de cada muestreo.

La medición de la temperatura del aire por estaciones meteorológicas presenta la ventaja de registrar datos constantemente a lo largo de año a no ser que exista un fallo del sensor por causas excepcionales, siendo una desventaja el número limitado de estaciones en la ciudad. Aunque los registros obtenidos por estaciones meteorológicas ofrecen una alta resolución temporal, estos están limitados al número de estaciones meteorológicas existentes.

3.4.1 Transectos urbanos.

El efecto de isla de calor urbana ha sido analizado previamente en Zaragoza. En el estudio de isla de calor urbana desarrollado por Cuadrat et al. (2002), aplicaron la metodología desarrollada por Conrads et al. (1971) para medir la temperatura del aire en climas urbanos. A lo largo de un año (una vez por semana) Cuadrat et al. (2002), realizaron recorridos por diversos transectos de la ciudad con un automóvil equipado con un aparato de medición para recopilar datos. Las observaciones las efectuaron durante la noche a una velocidad entre 20-30 Km/h para evitar turbulencias en el sensor de temperatura. Por último, Cuadrat et al. (2002), consideraron necesario establecer un periodo de tiempo (15seg-30 seg) y una distancia promedio (50m-150m) entre cada medida de temperatura, siendo descartadas las lecturas realizadas en días con lluvia o paradas forzosas del vehículo (semáforos). En los mapas térmicos realizados por Cuadrat et al. (2002) es posible observar como los sectores central y centro-oriental de la ciudad fueron los espacios urbanos que mostraron en mayor proporción de casos temperaturas elevadas, presentando diferencias entre 4 a 5°C respecto de las zonas más frescas de la ciudad. El fenómeno ICU fue perdiendo intensidad hacia la periferia urbana, en todas las direcciones pero en especial hacia el suroeste, sur y norte, siendo los descensos térmicos más moderados hacia el noreste y sureste de la ciudad.

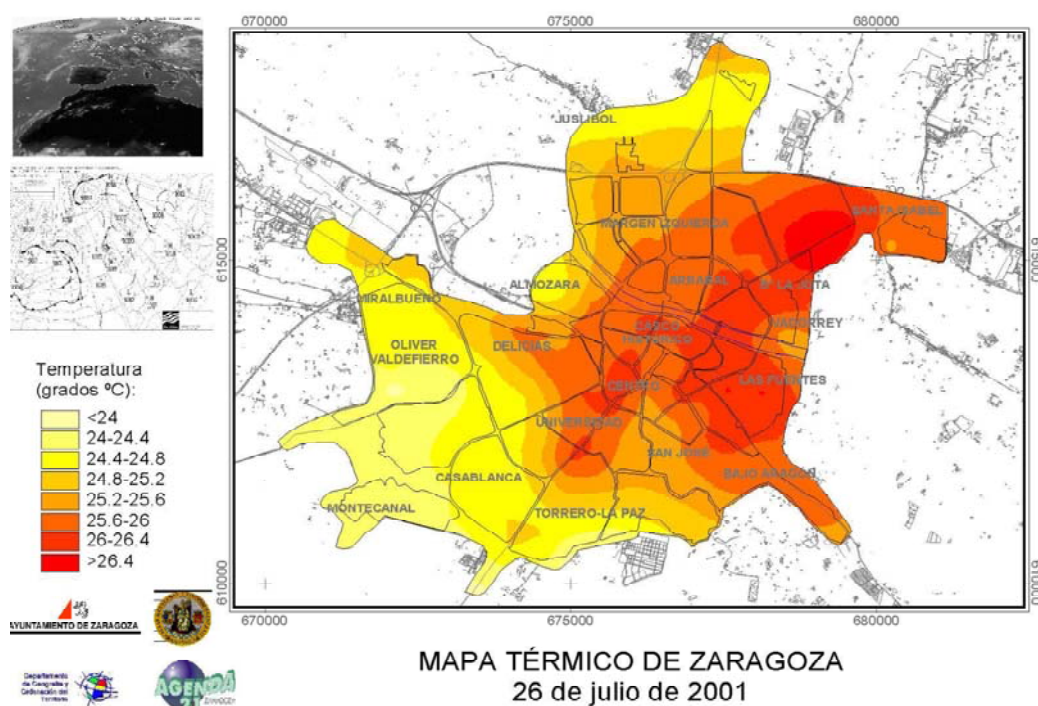


Figura 3.5 Mapa térmico del mes de julio del 2001 obtenido a través de interpolación geoestadística (krigging). (Cuadrat et al., 2002)

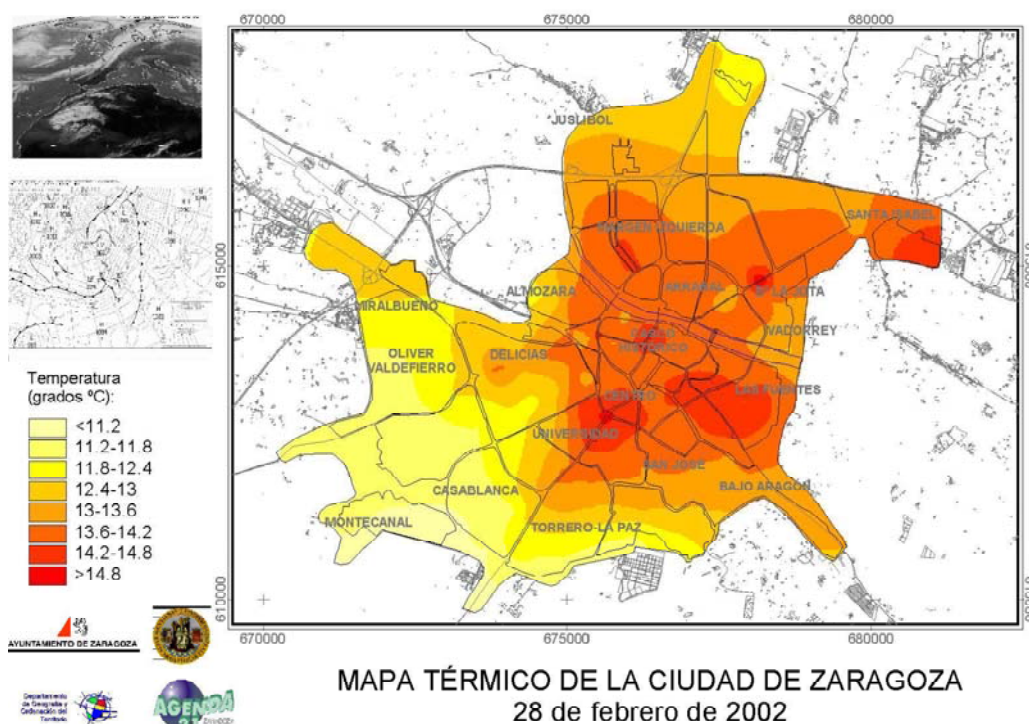


Figura 3.6 Mapa térmico del mes de febrero del 2002 obtenido a través de interpolación geoestadística (kriging). (Cuadrat et al., 2002)

3.4.2 Estaciones meteorológicas.

Los datos climáticos almacenados de manera puntual han sido recogidos con dos tipos de estaciones meteorológicas. El primer tipo de estación meteorológica es el modelo DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS utilizado por la AEMET (Agencia Española de Meteorología) para la monitorización del clima urbano de Zaragoza. En este sentido se han extraído datos meteorológicos de cuatro estaciones localizadas en distintos puntos de la ciudad: AEROUERTO, JAIME FERRAN (polígono Cogullada, ROGER DE FLOR (Delicias), CASA JÍMENEZ (Plaza Aragón, Centro).



a)



b)

Figura 3.7 a) Detalle de estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS, b) Estación meteorológica JAIME FERRÁN localizada en el polígono de Cogullada.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>Resolución</i>	<i>(+/-)</i>
Radiación Solar	0 a 1800 W/m ²	1 W/m ²	5%
Presión barométrica	540 a 1100 hPa	0.1 hPa	1.0 hPa
Temperatura Exterior	-40°C a 65°C	0.1°C	0.5°C
Humedad	0 a 100%	1%	3%, 4% arriba de 90%
Viento	1 a 80 m/s 0 a 360°	0.4 m/s 1°	1 m/s 3°

Tabla 3.1 Ficha técnica sensor DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS.

El segundo tipo de estación meteorológica del que se han extraído registros corresponde a un conjunto de monolitos instalados dentro del barrio de Valdespartera. En total existen dos monolitos instalados sobre las vialidades del barrio y uno más en el Centro de Urbanismo Sostenible (CUS). En la figura 3.8 se muestra la localización de las sondas meteorológicas.

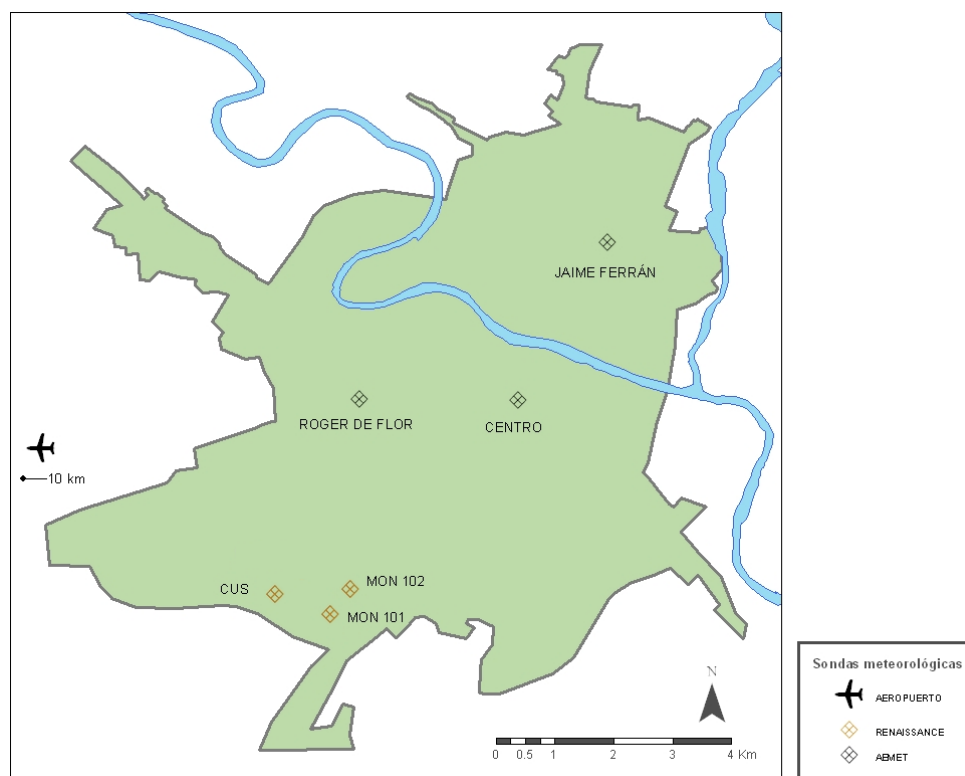


Figura 3.8 Localización de las sondas meteorológicas dentro de Zaragoza, España.

De la misma manera que Santamouris (2001) analizó el clima urbano de los distintos barrios de Atenas, Grecia. Se ha evaluado el clima local de los barrios donde están localizadas las estaciones meteorológicas. El registro de las estaciones

meteorológicas permite realizar un análisis de la ICU de manera puntual, siendo posible establecer una relación entre las características de los barrios con su correspondiente clima urbano. De la figura 3.9 a la figura 3.12 se observa el registro diurno y nocturno de la temperatura del aire en las temporadas de verano e invierno. En el eje de las abscisas, se reconoce una temperatura de referencia obtenida con los datos relativos al aeropuerto de Zaragoza. En el eje de las ordenadas se muestra la diferencia entre los datos de temperatura registrados por la respectiva estación meteorológica y los datos de temperatura registrados en el aeropuerto.

3.4.2.1 Monolito 101 y monolito 102.

El registro horario de las sondas de temperatura permite observar un comportamiento similar en los monolitos 101 y 102. Los días de verano el diferencial de temperaturas supera hasta los 8 °C (Figura 3.9a, Figura 3.9b) mientras las noches de verano esta diferencia se reduce de 0 a 4 °C (Figura 3.10a, Figura 3.10b). Por otro lado, tanto los días (Figura 3.11a, Figura 3.11b) como las noches de invierno mostraron temperaturas superiores a la referencia entre 0 y 5 °C (Figura 3.12a, Figura 3.12b).

3.4.2.2 Roger de Flor.

La estación meteorológica situada en el barrio Delicias, un barrio con una alta densidad de población, muestra un diferencial superior de temperatura entre 0 y 4°C cuando las temperaturas de los días de verano son máximas, siendo las primeras horas de la mañana las que presentan temperaturas inferiores respecto a la temperatura de referencia (Figura 3.9c). Durante las noches de verano (Figura 3.10c) y las noches de invierno se presenta un incremento notorio de la temperatura entre 0 y 5 °C con respecto a la sonda del aeropuerto (Figura 3.12c).

3.4.2.3 Jaime Ferrán y CUS.

Las sondas de temperaturas situadas tanto en el polígono industrial Cogullada como en el CUS (Centro de Urbanismo Sostenible), muestran patrones de temperatura muy similares con respecto a las registradas por el aeropuerto con diferencias de temperatura no mayores a los 2 °C (Figura 3.9d, Figura 3.9e). La razón principal de la semejanza de temperaturas estriba en la ubicación de ambas sondas, pues estas se encuentran en la periferia urbana y están completamente expuestas a las inclemencias climáticas al no estar influenciadas por edificios cercanos o por el equipamiento urbano.

3.4.2.4 Centro.

El comportamiento de la temperatura urbana en el centro de la ciudad muestra durante los días de verano temperaturas inferiores a la referencia (Figura 3.9f), mientras por las noches de verano existe un notorio aumento de la temperatura en el centro urbano (Figura 3.10f). En el periodo invernal las temperaturas diurnas (Figura 3.11f) y nocturnas fueron superiores entre 0 y 5 °C respecto a la referencia (Figura 3.12f).

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

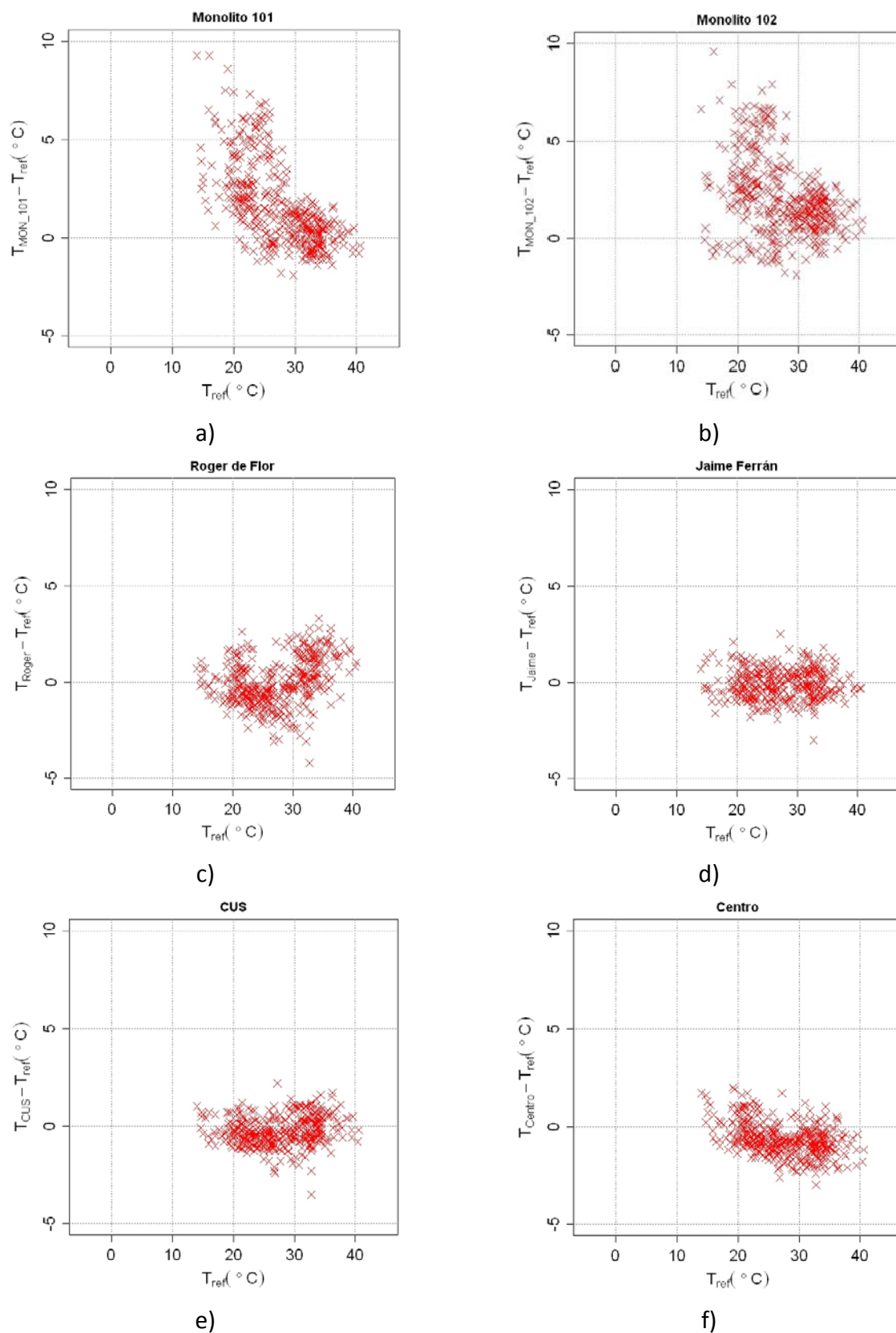


Figura 3.9 Crossplot de temperaturas ambiente en los días típicos de verano.

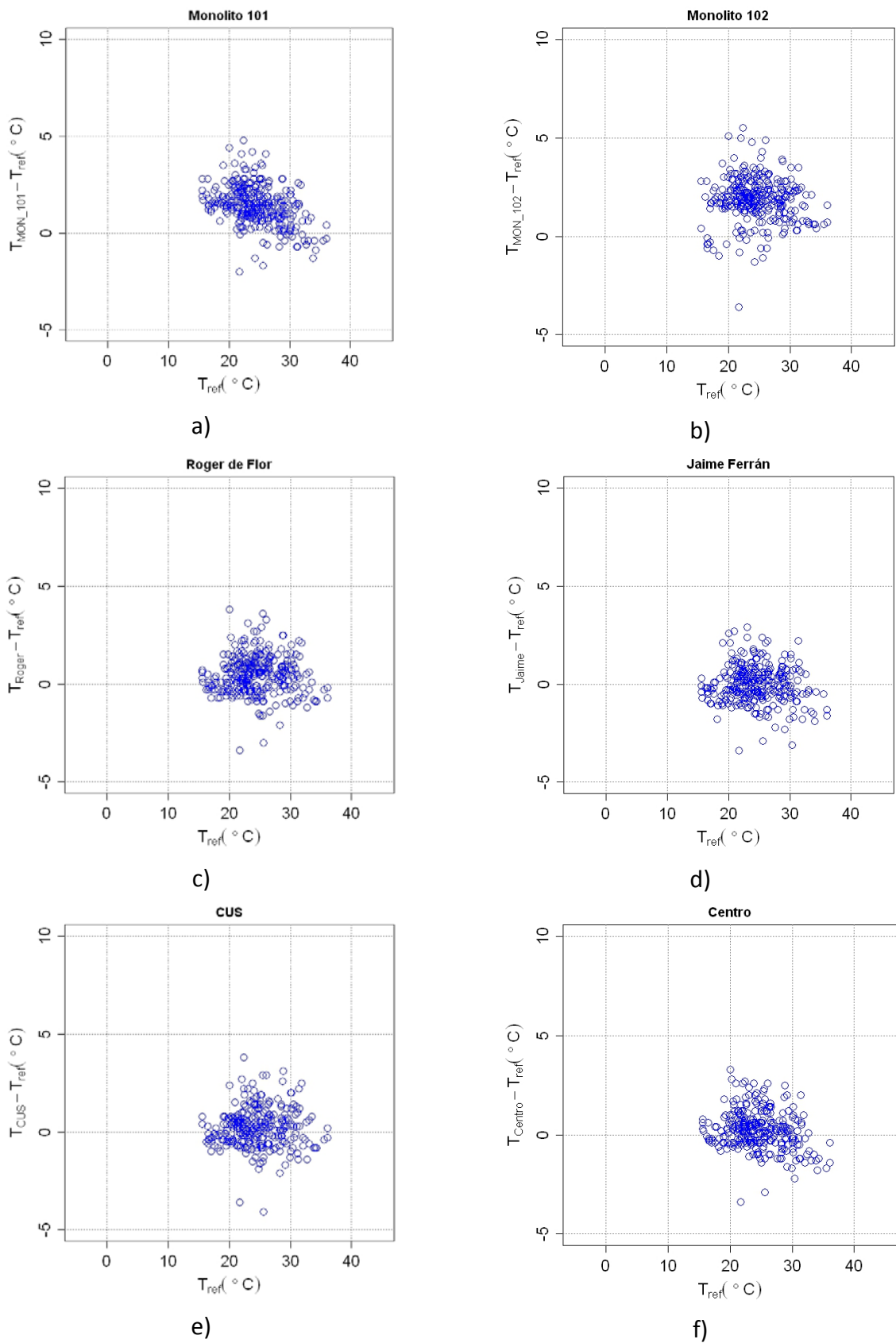


Figura 3.10 Crossplot de temperaturas ambiente en las noches típicas de verano.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

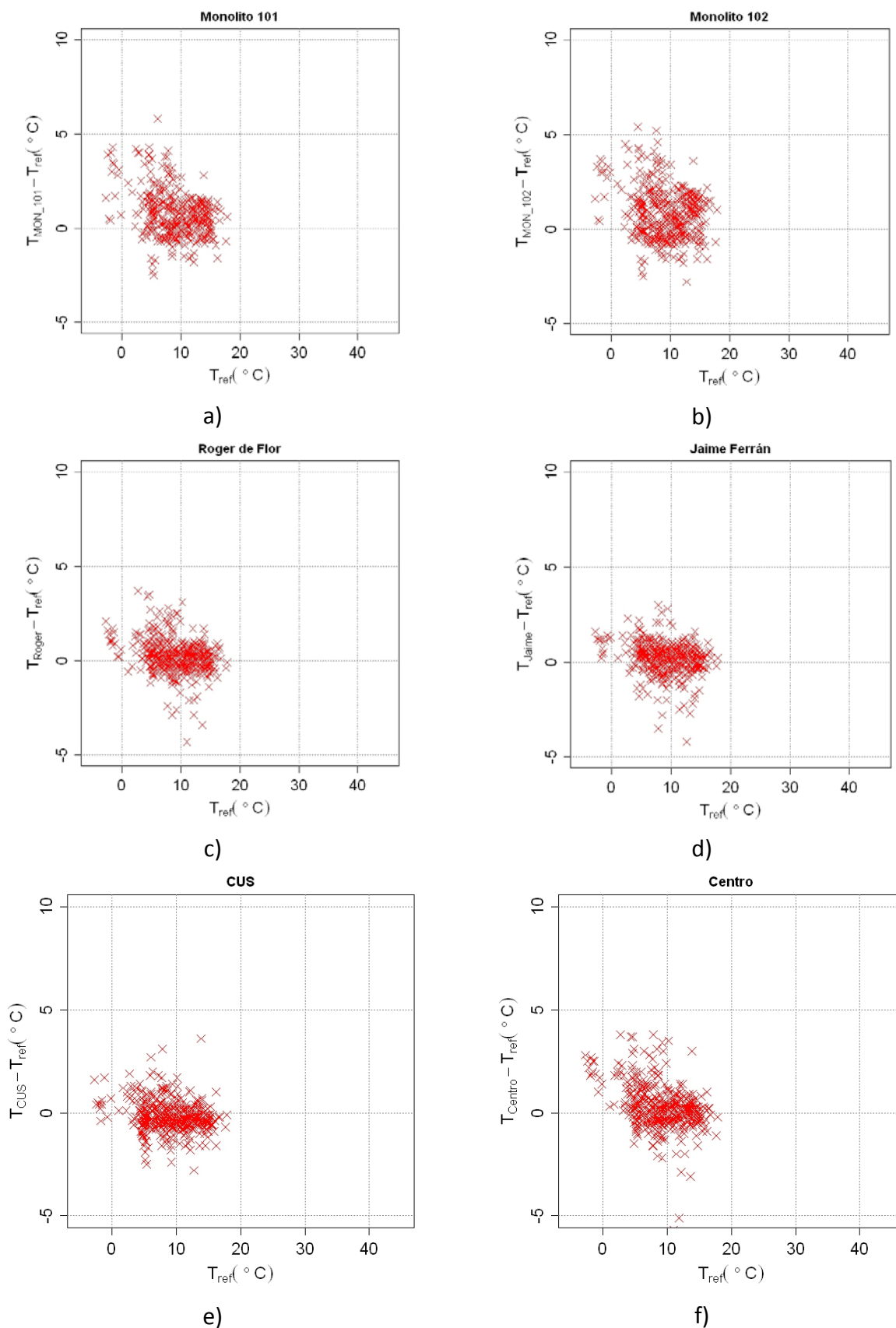


Figura 3.11 Crossplot de temperaturas ambiente en los días típicos de invierno.

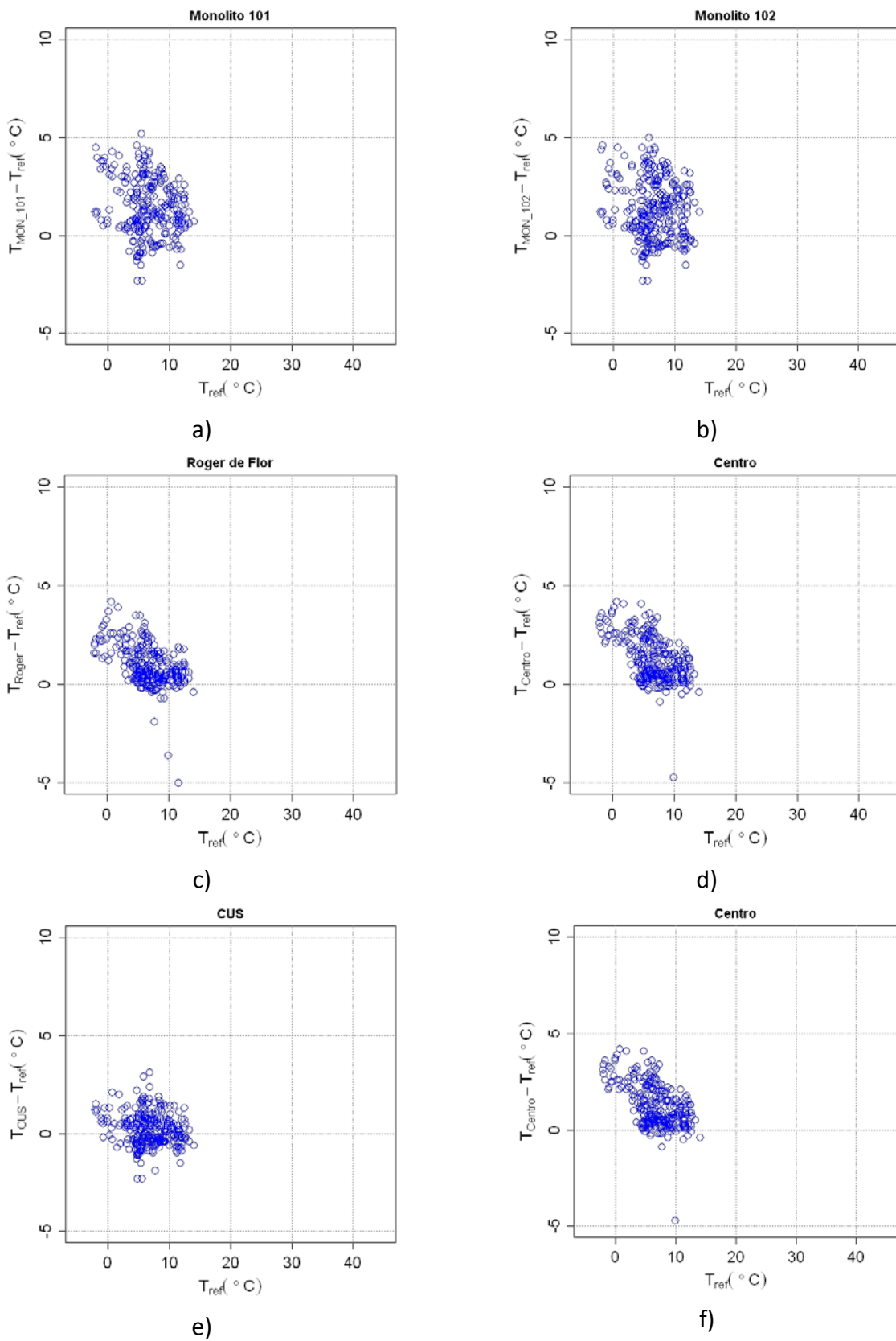


Figura 3.12 Crossplot de temperaturas ambiente en las noches típicas de invierno

3.5 Tratamiento digital de imágenes en teledetección.

La teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, o con métodos más convencionales como la fotografía aérea, o termografía. De todas estas, la teledetección desde satélite cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo (Chuvienco, 1996).

<i>Plataforma</i>	<i>Comentarios</i>
<i>Satelital</i>	Imágenes con amplias zonas de observación Resolución espacial limitada Cobertura temporal limitada Imágenes afectada por fenómenos atmosféricos
<i>Fotografía aérea</i>	Alta resolución espacial y temporal Alto costo de adquisición de imágenes Imágenes sin estandarizar
<i>Termografía</i>	Alta resolución espacial y temporal Imágenes con reducidas zonas de observación Imágenes sin estandarizar y con perspectiva

Tabla 3.2 Tipos de plataformas de observación remota.

Las tecnologías de teledetección satelital recopilan información de la superficie terrestre mediante la detección de energía radiante con sensores de amplio espectro electromagnético montados en satélites como: LANDSAT TM; LANDSAT ETM+; AVHRR; MODIS; ASTER y GOES. Cada uno de estos satélites ofrece una gran cantidad de productos digitales y detectan la energía radiante en una determinada longitud de onda del espectro electromagnético.

En este apartado se han aplicado técnicas de teledetección satelital para analizar los patrones de reflectividad, índices de vegetación y Temperatura Superficial Terrestre (TST), mediante el análisis de los flujos de energía radiante de las imágenes proporcionadas por las plataformas LANDSAT TM y LANDSAT ETM. En la actualidad las plataformas LANDSAT han liberado gran cantidad de imágenes satelitales para su libre uso, por lo que hace atractivo usar estas plataformas.

El proceso para obtener la reflectividad, los índices de vegetación y la TST no es sencillo y requiere de una serie de pasos y correcciones que se describen a lo largo de este apartado. Resumiendo, el proceso inicia transformando la imagen de energía radiante recibida por el satélite en una imagen de radiancia. Dicha radiancia ha de ser transformada en una imagen de reflectividad, que a su vez ha de ser traducida en un índice de vegetación y en una imagen de emisividad. Finalmente, se ha de aplicar la ley de Plank que utiliza las imágenes de radiancia y emitancia para obtener la TST.

3.5.1 Energía radiante.

Los sensores de teledetección satelital miden energía radiante desde la capa superior de la atmosfera a una determinada longitud de onda del espectro electromagnético (bandas de observación).

De acuerdo con Schmugge et al (1998), para estimar el flujo de energía sobre superficies se necesitan tres tipos de información satelital:

- La asociada con los flujos de energía por conducción asociada con la energía solar incidente, el albedo, la absorptividad, entre otros.
- La vinculada con el contenido de humedad superficial y la relación suelo-vegetación.
- Finalmente la relacionada con la capacidad de la atmosfera para absorber y reflejar energía, la cual depende de la temperatura del aire, del vapor de agua, y de la velocidad del viento.

Ahora bien, la radiancia en la capa superior de la atmosfera es resultado de dos fracciones de energía:

- La radiancia emitida por la superficie terrestre.
- La radiancia emitida de la misma atmosfera.

La diferencia entre la radiancia en la capa superior de la atmosfera y la radiancia superficial terrestre generalmente oscila en un rango de 10-12 μ m de la región espectral. (Prata et al. 1995). Por lo tanto, los efectos atmosféricos, incluidos los efectos de absorción superficial terrestre y los efectos de radiancia reflejada por la superficie terrestre deben ser corregidos (Franca et al. 1994).

3.5.2 Radiancia en el techo de la atmosfera con corrección de dispersión atmosférica.

La metodología de corrección radiométrica de una imagen satelital (LANDSAT TM y LANDSAT ETM+) comienza por la corrección de la radiancia emitida por la atmosfera por el método de Chávez (1996). En cada una de las bandas de observación (Tabla 3.3) se considera el primer nivel digital (*ND* o pixel) como un cuerpo oscuro, para ello se debe realizar una substracción de la radiancia excedente.

$$ND_{Banda\ n, Correccion\ atmosferica} = ND_{Banda\ n} - Minimo\ ND_{Banda\ n} \quad (3.1)$$

En la tabla 3.3 se presentan las bandas de observación de las plataformas LANDSAT.

<i>Banda</i>	<i>Longitud de onda</i>	<i>Región del espectro</i>	<i>Abreviatura</i>
1	0.45 - 0.52 μm	Visible, azul	VISA
2	0.52 - 0.60 μm	Visible, verde	VISV
3	0.63 - 0.69 μm	Visible, rojo	VISR
4	0.77 - 0.90 μm	Infrarrojo cercano	NIR
5	1.55 - 1.75 μm	Infrarrojo Medio	SWIR
6	10 -12 μm	Infrarrojo Térmico	TIR
7	2.06-2.35 μm	Infrarrojo Medio	SWIR

Tabla 3.3 Rango espectral plataforma LANDSAT TM.

3.5.3 Radiancia espectral.

El cálculo de la radiancia espectral del sensor es el paso fundamental en la conversión de datos de imágenes de múltiples sensores y plataformas en una magnitud radiométrica. La calibración radiométrica de los sensores TM y ETM+ implica reescalar los Niveles Digitales que se transmiten desde el satélite con constantes de calibración CPF (Calibration Parameter File) proporcionadas por el USGS (United Stated Geological Survey), dichas contantes de calibración tienen la misma escala radiométrica para todas las imágenes procesadas para un periodo específico. Cabe la pena mencionar que EUROIMAGE también presenta constantes de calibración para los sensores TM y ETM sin embargo existe cierta controversia entre el modelado en USGS y EUROIMAGE. Como las imágenes satelitales utilizadas en este proyecto se adquirieron del USGS se utilizaron sus correspondientes constantes de calibración.

La relación entre los Niveles Digitales (ND) y la radiancia espectral queda descrita por la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = (G_{Banda \lambda} ND) + B_{Banda n} \quad (3.2)$$

Donde:

$$G_{Banda \lambda} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{ND_{max} - ND_{min}} \quad (3.3)$$

$$B_{Banda n} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{ND_{max} - ND_{min}} \right) ND_{min} \quad (3.4)$$

$$L_{\lambda} = \text{Radiancia espectral} \left[\frac{W}{m^2 sr} \mu m \right]$$

$$ND_{max} = 255 \text{ (Landsat TM y Landat ETM)}$$

$$ND_{min} = 1 \text{ (Landsat TM y Landat ETM)}$$

$$LMIN_{\lambda} = \text{Constante de calibración } ND_{min} \left[\frac{W}{m^2 sr} \mu m \right]$$

$$LMAX_{\lambda} = \text{Constante de calibración } ND_{max} \left[\frac{W}{m^2 sr} \mu m \right]$$

$$G_{Banda \lambda} = \text{constante de calibración, Ganancia Espectral}$$

$$B_{Banda n} = \text{constante de calibración, Bias Offset}$$

Las constantes de calibración se encuentran adjuntos en el fichero de cabecera de cada una de las imágenes satelitales, sin embargo Chander et al. (2009) propone utilizar las constantes de calibración de la tabla 3.4 y la tabla 3.5 en caso de carecer de dichas constantes. En este trabajo se han utilizado las constantes de calibración asociadas al fichero de cabecera de cada una de las imágenes satelitales sin embargo las constantes propuestas por Chandler también pueden ser utilizadas. El cálculo de la radiancia espectral se obtiene aplicando las constantes de calibración a la ecuación 3.2, sin olvidar los Niveles Digitales han tenido un tratamiento previo de corrección atmosférica.

<i>Banda</i>	<i>LMIN</i> λ (W/m ² sr μ m)	<i>LMAX</i> λ	<i>Gain</i> (W/m ² sr μ m)/ND	<i>Bias (offset)</i> (W/m ² μ m)
1	-1.52	193	0.766	-2.286
2	-2.84	365	1.448	-4.288
3	-1.17	264	1.044	-2.214
4	-1.51	221	0.876	-2.386
5	-0.37	30.2	0.120	-0.490
6	1.238	15.303	0.055	1.182
7	-0.15	16.6	0.066	-0.216

Tabla 3.4 Constantes de calibración para Landsat TM de acuerdo a Chandler (2009).

<i>Banda</i>	<i>LMINλ</i> (<i>W/m² sr μm</i>)	<i>LMAXλ</i>	<i>Gain</i> (<i>W/m² sr μm</i>)/ <i>ND</i>	<i>Bias (offset)</i> (<i>W/m² μm</i>)
1	-6.2	293.7	1.181	-7.381
2	-6.4	300.9	1.210	-7.610
3	-5	234.4	0.943	-5.943
4	-5.1	241.1	0.969	-6.069
5	-1	47.57	0.191	-1.191
6_L	0	17.04	0.067	-0.067
6_H	0	17.04	0.067	-0.067
7	-0.35	16.54	0.066	-0.416

Tabla 3.5 Constantes de calibración para Landsat ETM+ de acuerdo a Chandler (2009).

3.5.4 Reflectividad.

Para obtener imágenes de reflectividad, estas se deben corregir teniendo en cuenta los valores obtenidos de la radiancia en la capa superior de la atmosfera, la rugosidad de la superficie terrestre, y los factores de calibración de la plataforma satelital. Además se debe considerar que las imágenes de radiancia espectral tienen cierta variabilidad temporal por lo que es conveniente transformar dicha imagen en una imagen de reflectividad espectral, también conocida como reflectividad en el techo de la atmosfera; y posteriormente en una imagen de reflectividad con normalización topográfica.

3.5.4.1 Reflectividad espectral

Existen varias ventajas al utilizar la reflectividad espectral. En primer lugar, se elimina el efecto del ángulo cenital solar. Dicho ángulo es complementario al ángulo de elevación solar. En segundo lugar la reflectividad espectral considera los diferentes valores de la irradiancia exo atmosférica de las diferentes bandas espectrales. Los valores de irradiancia exo atmosférica están localizados en el fichero de cabecera CPF, sin embargo Chander et al. (2009) presentan la posibilidad de utilizar los valores presentados en la tabla 3.6. En tercer lugar, la reflectividad espectral corrige la variación de la distancia Tierra-Sol entre las distintas fechas de adquisición de datos. Estas variaciones pueden ser importantes geográfica y temporalmente.

<i>Plataforma</i> <i>[W/m² μm]</i>	<i>Banda 1</i>	<i>Banda 2</i>	<i>Banda 3</i>	<i>Banda 4</i>	<i>Banda 5</i>	<i>Banda 7</i>
LANDSAT TM	1983	1796	1536	1031	220	83.44
LANDSAT ETM	1997	1812	1533	1039	230.8	84.9

Tabla 3.6 Irradiancia solar en el techo de la atmosfera.

Por último, la reflectividad espectral considera la transmisividad de los flujos de energía radiante incidente y reflejada. Para la transmisividad incidente se pueden tomar los valores estándar recomendados por USGC para las bandas de LANDSAT TM y LANDSAT ETM+ en condiciones de atmosfera despejada. Tabla 3.7.

<i>Plataforma</i>	<i>Banda 1</i>	<i>Banda 2</i>	<i>Banda 3</i>	<i>Banda 4</i>	<i>Banda 5</i>	<i>Banda 7</i>
LANDSAT TM/ETM+	0.7	0.78	0.85	0.91	0.95	0.97

Tabla 3.7 Valores estándar transmitividad incidente.

La radiancia espectral puede ser convertida en reflectividad espectral, también conocida como albedo planetario o reflectividad aparente mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s \tau_i} \quad (3.5)$$

Donde:

ρ_{λ} = *reflectividad espectral*

π = 3.14159

L_{λ} = *Radiancia espectral banda λ*

$$d = 1 + \varepsilon \left(\sin \left(2\pi \left[\frac{J - 93.5}{J_m} \right] \right) \right); \text{Distancia Tierra - Sol [Undades Astronomicas]}$$

ε = 0.01674; *excentricidad de la órbita terrestre*

J = *Día Juliano*

J_n = *Número de dias del año*

$ESUN_{\lambda}$ = *Irradiancia solar en el techo de la atmósfera*

θ_s = *Ángulo cenital solar*

τ_i = *Transmisividad incidente*

Otro elemento importante que conviene considerar en el cálculo de la reflectividad es el efecto del relieve y para ello se han de utilizar modelos digitales de elevaciones. Los modelos digitales de elevaciones son una representación espacial de la superficie terrestre que incluyen sólo información de altura del terreno sin ningún tipo de definición más precisa sobre la superficie (Peckham et al.,2007).

3.5.4.2 Reflectividad espectral normalizada topográficamente.

La reflectividad espectral requiere de un proceso de una normalización topográfica y es necesario considerar el uso de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) (Bishop et al. 2003). Diversos autores han tratado de corregir la influencia de la topografía sobre la irradiancia espectral sobre superficies lambertianas o no lambertianas con modelos de corrección empírica (Ekstrand et al. 1996, Colby et al. 1998). En este trabajo, para reducir la variación espectral de las imágenes causadas por la topografía se utiliza la corrección de Minnaert para reducir el efecto topográfico en las imágenes de satélite. El procedimiento de corrección topográfica por Minnaert considera que el coseno del ángulo de incidencia es proporcional a la radiación solar directa, por lo tanto:

$$\cos i = \cos \theta_s \cos \beta_t + \sin \theta_s \sin \theta_s (\phi_t - \phi_s) \quad (3.6)$$

Donde θ_s es el ángulo cenital solar, β_t es el ángulo de la pendiente sobre el terreno, ϕ_s es el ángulo de azimut solar y ϕ_t es el ángulo de orientación sobre el terreno.

El proceso de corrección de Minnaert con el procedimiento propuesto por Colby et al. (1998) estima la radiación espectral con corrección topográfica como:

$$L_{\lambda, top} = \frac{L_{\lambda} \cos \beta_t}{\cos^k i \cos^k \beta_t} \quad (3.7)$$

Donde k es la constante de Minnaert que controla la difusividad de la superficie. Este valor puede variar de 0 a 1 de acuerdo a su comportamiento especular o isotrópico respectivamente.; y $L_{\lambda, top}$ es la reflectividad espectral normalizada topográficamente de los distintos Niveles Digitales (píxeles) de la imagen. En la tabla 3.8 se muestran el valor de la constante de Minnaert para las distintas bandas de observación de los satélites LANDSAT TM y LANDSAT ETM+.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
k Minnaert	0.21	0.29	0.44	0.46	0.53	0.95

Tabla 3.8 Constante de Minnaert para los satélites Landsat TM.

3.5.5 Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

La vegetación en zonas urbanas representa una medida de mitigación del efecto ICU y las diferencias en la temperatura radiante entre la vegetación y el suelo urbano afectan la temperatura superficial terrestre (TST) (Sandholt et al., 2002). Para las zonas sin vegetación, las mediciones de la TST normalmente representan la temperatura radiométrica de las superficies iluminadas por el sol, tales como el suelo desnudo. Cuando aumenta la cantidad de cobertura vegetal, la energía radiante registrada por el sensor se aproxima más cerca a la temperatura de las hojas verdes.

La relación entre la TST y la abundancia de la vegetación, ha sido ampliamente documentada por diversos autores, en este sentido uno de los índices más representativos para medir el rigor de la vegetación es el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Las medidas de NDVI están una función de la reflectancia visible e infrarrojo cercano,

$$NDVI = \frac{NIR - VIS_R}{NIR + VIS_R} \quad (3.8)$$

Donde NIR y VIS es la reflectividad espectral normalizada topográficamente, en el infrarrojo próximo (0.772-0.898 μm) y el rojo visible (0.631-0.692 μm), respectivamente. En concreto los satélites LANDSAT TM y LANDSAT ETM asignan el NIR a la Banda 4 y el VIS_R a la Banda 3.

El NDVI indica que si hay mucha más radiación reflejada en las longitudes de onda del infrarrojo cercano que en longitudes de onda visible, la vegetación en ese Nivel Digital es probable que sea densa y puede contener algún tipo de vegetación. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de -1.0 a 1,0. Un alto rigor de vegetación comprende valores cercanos al 1,0 y un bajo rigor de vegetación oscila en los valores de -1.0.

En general, los Niveles Digitales de una imagen no están completamente ocupados por una única vegetación homogénea o por una cubierta de suelo desnudo homogénea, el índice NDVI representa una mezcla de vegetación y de suelo desnudo, y como resultado se tiene una firma espectral compuesta. Para calcular la fracción de cubierta vegetal se utiliza la relación propuesta por Valor et al, (1996).

$$P_V = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right) - k \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_v}\right)} \quad (3.9)$$

Donde:

$NDVI_s$ es el valor NDVI de una cubierta de suelo desnudo.

$NDVI_v$ es el valor NDVI de una cubierta vegetal

$$k = \left(\rho_{v(\lambda_4)} - \rho_{v(\lambda_3)}\right) / \left(\rho_{s(\lambda_4)} - \rho_{s(\lambda_3)}\right)$$

Donde $\rho_{v(\lambda_4)}$ y $\rho_{v(\lambda_3)}$ es la reflectividad espectral normalizada topográficamente en el NIR y VIS_R en Niveles Digitales de vegetación máxima; $\rho_{s(\lambda_4)}$ y $\rho_{s(\lambda_3)}$ es la reflectividad espectral normalizada topográficamente en el NIR y VIS_R de Niveles

Digitales de suelo desnudo. La fracción de cubierta vegetal (P_V) se ha utilizado para cuantificar patrones de vegetación dentro de las ciudades y además es fundamental para estimar la emisividad de las distintas cubiertas urbanas, en este sentido el $NDVI_s$ y el $NDVI_v$ se ha extraído del entorno urbano.

3.5.6 Emisividad.

La emisividad de las cubiertas depende de un gran número de factores tales como el contenido de agua, composición química, estructura y rugosidad (Synder et al, 1998); y su determinación es indispensable para la obtención de la temperatura superficial terrestre. Por lo tanto es necesario estimar la emisividad en función del tipo de cubierta terrestre y esto se realiza utilizando diferentes técnicas.

El método utilizado por Gillespie et al. (1985) propone relacionar la emisividad con la temperatura superficial terrestre obtenida mediante satélites ASTER; Becker et al. (1990) han sugerido índices térmicos espectrales y los han relacionado con distintos niveles de emisividad; Snyder et al. (1998) han propuesto clasificar los distintos tipos de emisividad de acuerdo con distintos tipos de cubiertas. Por último Valor et al. (1996) exponen utilizar el método NVDI (Normalized Difference Vegetation Index) como método de obtención de la emisividad en cubiertas.

En este proyecto se utiliza el método propuesto por Valor et al. (1996) para determinar la emisividad de las distintas superficies urbanas.

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_V + \varepsilon_s (1 - P_V) + d\varepsilon \quad (3.10)$$

Donde:

P_V es la fracción de cubierta vegetal

ε_v es la emisividad de la vegetación

ε_s es la emisividad del suelo desnudo

Los valores de emisividad de la vegetación ε_v y la emisividad del suelo desnudo ε_s considerados de acuerdo a la clasificación de Snyder et al. (1998) son 0.978 y 0.914, respectivamente; $d\varepsilon$ es el factor de corrección de la emisividad, $d\varepsilon = 0$ para suelo desnudo, $d\varepsilon = 0.005$ para berbecho, $d\varepsilon = 0.003$ para vegetación de baja altura y $d\varepsilon = 0.03$ vegetación superior a 0.5 metros.

El uso de este valor de emisividad ε debe ser corregido y ajustado a las longitudes de onda de la banda térmica (8-14 μ m) con la ecuación propuesta por Rubio et al (1997):

$$\varepsilon_{\lambda 6} = a\varepsilon + b \quad (3.11)$$

Donde ε_T es la emisividad de las cubiertas en la banda térmica, las constantes a y b para la banda térmica de las plataformas LANDSAT son 0.101 y 0.877, respectivamente.

3.6 Técnicas teledetección en la estimación de la temperatura superficial terrestre (TST).

La TST se origina en la capa inferior de la atmosfera y es causada principalmente por la radiación de las superficies urbanas y su respectivo intercambio de energía, y al calor antropogénico (Voogt et al., 1998). Rao et al. (1972) fue el primero en evaluar la posibilidad de la detección de la isla de calor con sistemas de teledetección satelital. A partir de entonces, una amplia variedad de satelitales han sido empleados para determinar el efecto ICU, y cada vez más, el avance de la tecnología provee mejoras en la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de los sensores satelitales. En otras palabras, el conjunto de repuestas térmicas de un fenómeno o proceso específico medidas por un sensor de teledetección satelital en particular, no puede extrapolarse para predecir las temperaturas superficiales terrestres (TST) grabadas en diferentes momentos, y mucho menos será posible utilizar otros sensores de teledetección para medir la TST de distintas zonas urbanas. Por lo que se hace indispensable tener una imagen con la suficiente calidad espacial, espectral y temporal, que sea representativa de un caso de análisis de la TST.

Existen diversos métodos para la observación TST y se pueden catalogar en observación con una banda espectral ó en observación de la TST con varias bandas espectrales. Entre las metodologías de observación con una sola banda de observación se encuentra el método desarrollado por Sobrino et al. (2004) que ha examinado el comportamiento térmico con la banda térmica del satélite LANDSAT TM.

Varios algoritmos han sido desarrollados para convertir la de energía radiante en TST, sin embargo, no hay un método universalmente aceptado ya que la energía radiante es observada en una determinada longitud de onda y depende del satélite con el que se realiza el estudio. En concreto la bibliografía existente utiliza principalmente tres distintos enfoques para determinar la temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales.

Un primer método utiliza la radiancia espectral, con su respectiva corrección atmosférica, y la emisividad en la banda térmica para determinar la TST de las superficies de acuerdo a la estimación de la Temperatura de Brillo Superficial postulada en la Ley de Planck.

Un segundo método aplica la técnica de "split-window", y considera la radiancia espectral con corrección atmosférica entre dos bandas térmicas cercanas (Dash et al., 2002), es un método ideal para determinar TST sobre superficies marinas y no funciona con las plataformas LANDSAT debido a que solo tienen una banda térmica de observación.

El tercer método propuesto por Jiménez et al. (2003) aplica la corrección atmosférica corrigiendo la influencia del vapor de agua y la temperatura del aire para

posteriormente calcular la TST, es un método utilizado para el análisis de grandes superficies y requiere de la disponibilidad de información y de métodos de interpolación para la estimación de la temperatura ambiente. Las fuentes de error en la determinación de la TST están asociados con los efectos atmosféricos pueden introducir un error en la estimación de 0,2 K y 0,7 K, y la emisividad de la superficie terrestre puede producir un error de hasta 0,2 K y 0,4 K (Jiménez et al., 2006); en otro estudio Wukelic et al. (1989) afirma que la corrección de la temperatura superficial terrestre a través de datos locales para ajustar los efectos atmosféricos modifica la TST sobre suelo desnudo menos de 1 C°.

En este proyecto se determina la TST mediante la Ley de Plank con la correspondiente corrección atmosférica de la radiancia espectral y la corrección de la emisividad sobre superficies urbanas.

3.6.1 Ley de Plank (Temperatura de Brillo Superficial).

De acuerdo a la ley de Planck, se establece que la temperatura de brillo de cuerpo negro está en función de su respectiva longitud de onda se tiene la ecuación:

$$T_C = \frac{C_2}{\lambda_n \ln\left(\frac{C_1}{\lambda_c^5 \pi L_\lambda} + 1\right)} \quad (3.12)$$

Donde T_C es la temperatura de cuerpo negro en una longitud de onda central, L_λ es la energía radiante, λ_c es la longitud de onda del sensor, C_1 es la primer constante de radiación ($3.7451 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$), y C_2 es la segunda constante de radiación.

La plataforma LANDSAT TM en su banda 6 recopila información de radiancia (λ_c) en el infrarrojo térmico (10.44-12.42 μm). La razón de utilizar la banda del infrarrojo térmico para determinar la Temperatura de Brillo Superficial es que en este rango espectral se está más cerca de la radiación pico de cuerpo negro emitida por las superficies urbanas.

3.6.2 Temperatura superficial terrestre (TST)

La ecuación anterior estima el valor de temperatura de un cuerpo negro, por lo que es necesario realizar una corrección de la emisividad de acuerdo a la naturaleza de las cubiertas. Por lo tanto la TST está en función de un valor de emisividad, en este sentido se ha de utilizar la clasificación de emisividades con el método propuesto por Valor et al.,(1996). La ecuación en función de la emisividad de las superficies urbanas queda de la forma:

$$TST = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{[\varepsilon_{\lambda 6} K_1]}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3.13)$$

Donde L_λ es la radiancia espectral; $\varepsilon_{\lambda 6}$ es la emitancia en la banda térmica; K_1 y K_2 son constantes calibración que dependen del sensor de la plataforma satelital, tabla 3.9.

Constantes de calibración	K_1 [W/m ² srμm]	K_2 [K]
LANDSAT TM	607.76	1260.56
LANDSAT ETM+	666.09	1282.71

Tabla 3.9 Constantes de calibración sensor térmico LANDSAT TM y LANDSAT ETM+ (Chander et al., 2009).

3.7 Selección de imágenes satelitales.

Las imágenes de reflectividad, índices de vegetación y Temperatura Superficial Terrestre requieren llevar a cabo un proceso de corrección digital y un respectivo modelado de ecuaciones. Pero aún cuando se lleva a cabo este proceso, no todas las imágenes son aptas para llevar a cabo el estudio ICU debido a que existen condiciones meteorológicas adversas, como lo son la presencia de nubes sobre la imagen satelital, a días sumamente fríos antes de la captura de las imágenes, a desperfectos de los sensores satelitales, pixeles perdidos en la imagen ó a la aparición de bandeo (presencia de líneas oscuras y claras en la imagen).

Un claro ejemplo de imágenes defectuosas son las que ha proporcionado LANDSAT ETM+ en los últimos años. La problemática de las imágenes LANDSAT ETM+ estriba en que este satélite presentó un fallo instrumental a partir del 31 de mayo del 2003 perdiendo cerca del 22% de la imagen y lamentablemente la zona urbana de Zaragoza se encuentra dentro de la franja con distorsiones (Figura 3.13). Razón por la cual, en este proyecto se han utilizado exclusivamente imágenes del satélite LANDSAT TM, aunque cabe la pena mencionar que este tipo de imágenes no está libre de fallas en el sensor. (Figura 3.14).

El satélite LANDSAT TM tiene un periodo de repetición de 16 días, una imagen cubre un área igual a 185 kilometros por escena y presenta una resolución espacial de 30 metros por celda (Nivek Digital o pixel) en todas las bandas de observación, excepto la banda térmica que tienen un Nivel Digital 120 metros. Se adquirieron treinta y cinco imágenes satelitales proporcionadas por el servicio de distribución de imágenes USGS (United Stated Geological Survey) entre las trayectorias (199/31) y (200/31).

De estas imágenes algunas presentaron nubosidad sobre la ciudad por lo que fueron descartadas. Las nubes presentan una alta reflectividad y altos contenidos de partículas de agua, y cubren las superficies que se desean estudiar, ya sea por la misma que o por su sombra (Figura 3.15). Otro tipo de imágenes presentaron una

baja energía radiante en todas sus bandas de observación, agravando el problema en la banda térmica, esto relacionado con días fríos antes de la captura de la imagen, como la que se observo el día 25 de diciembre del 2011. Además que la aparición de bandeo es inherente a las imágenes térmicas del sensor TM, por lo que se utilizaron las imágenes de energía radiante de la banda 6 aún con la presencia de líneas tenues que atraviesan la imagen en forma diagonal de izquierda a derecha (Figura 3.16). Finalmente de cerca de treinta y cinco imágenes tratadas digitalmente solo diez de ellas reunieron las condiciones de nula nubosidad en el área de estudio, condiciones meteorológicas estables, y además sin problemas relativos a la calibración del sensor TM.

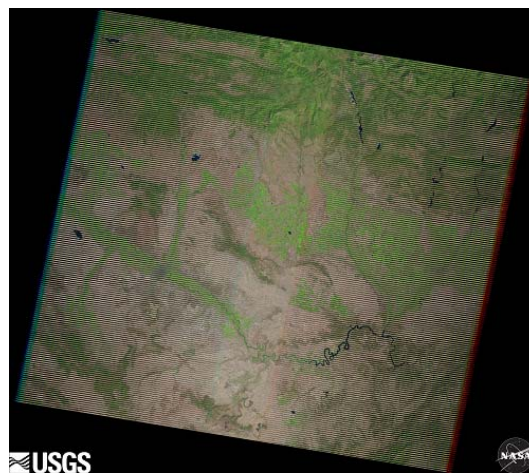


Figura 3.13 Fallo de barrido en sensor ETM+ para imágenes posteriores a marzo del 2003.



Figura 3.14 Imagen con fallo en el sensor.



Figura 3.15 . Imagen en falso color (Bandas 4,5,3) con presencia de nubosidad.



Figura 3.16 Aparición de bandeo en banda térmica.

3.8 Temperatura Superficial Terrestre del entorno urbano.

En la figura 3.17 se muestran las diez imágenes de TST que cumplen las condiciones óptimas para poder realizar el estudio ICU. En primer lugar se dispone de dos imágenes satelitales correspondientes al 31 de julio del 2003 y al 25 de agosto del 2003, consideradas para realizar un estudio temporal, y verificar los cambios en el uso de suelo. A su vez se poseen dos imágenes del 2009, una correspondiente al 22 de junio y otra correspondiente al 10 de septiembre. Del año 2010 se han utilizado las imágenes de TST de los días 11 y 18 de julio. Finalmente, y con el fin de realizar un análisis estacional se han considerado las imágenes del 9 de abril, 11 de mayo, 28 de junio y 7 de septiembre del 2011.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

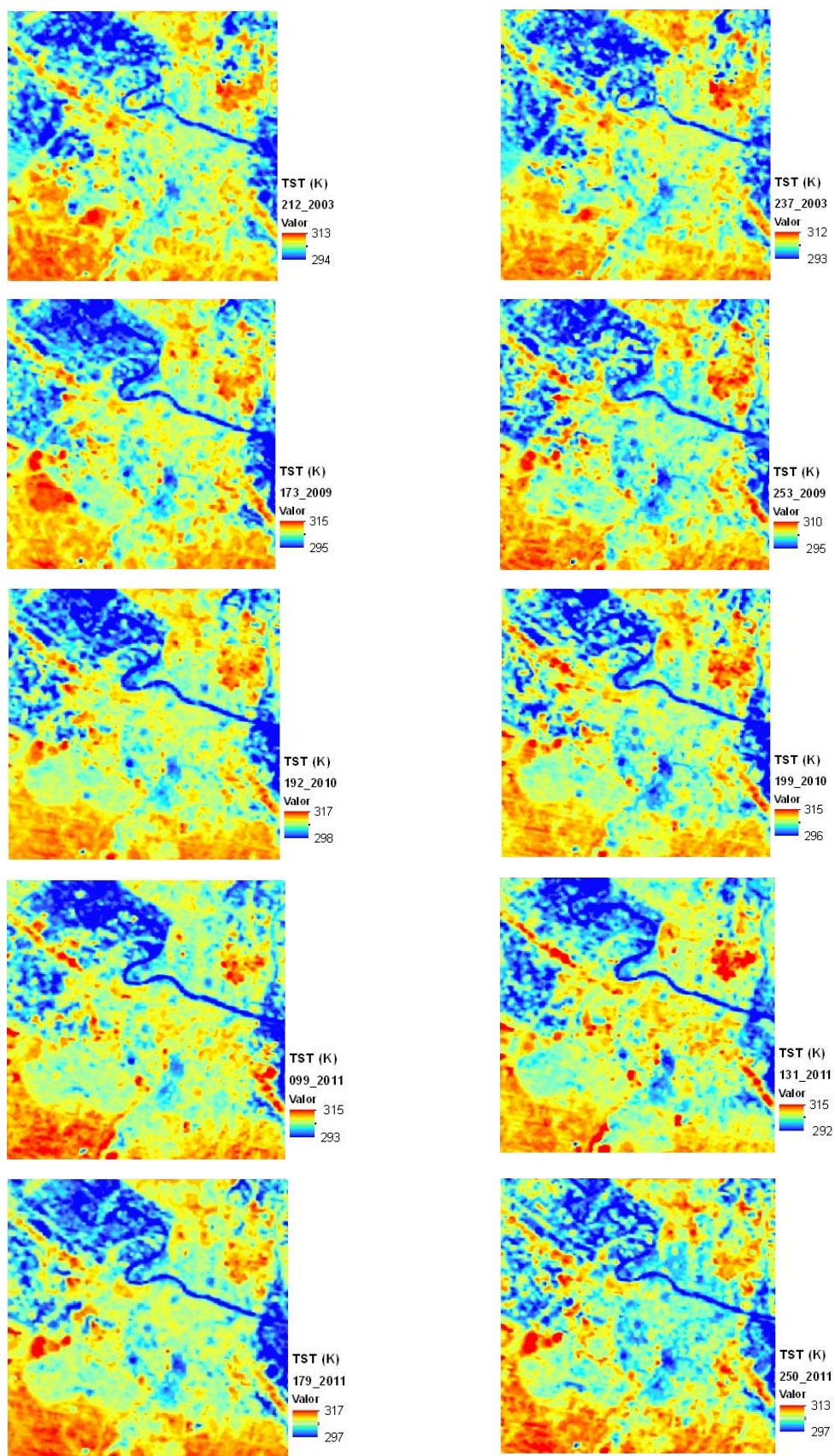


Figura 3.17 . Imágenes TST consideradas para el estudio de ICU.

3.8.1 Primer análisis exploratorio de las imágenes de TST.

Cada una de las diez imágenes de TST contiene 230400 (480x480) celdas con información de temperatura superficial, por lo tanto para comprender la información es imprescindible realizar un análisis estadístico para poder describir las imágenes en su conjunto. Un primer acercamiento al tratamiento estadístico de los datos lleva a determinar la TST media para cada una de las imágenes, con su correspondiente desviación estándar (Tabla 3.10). Entre la información relevante que se puede obtener de la tabla 3.10, se observa que los días de verano son los que presentan una temperatura media más elevada, directamente relacionada por las condiciones climáticas de calor que se presentan en la temporada, a su vez los datos presentan una mayor dispersión y un mayor intervalo entre temperaturas máximas y mínimas. Por el contrario, en los días cercanos a primavera y otoño se nota un decremento significativo en la TST media de cada una de las imágenes, viéndose también reducida la diferencia entre máximos y mínimos de TST.

Día	Día Juliano	TST media	Desviación estándar
2003-07-31	212	305.9	2.9
2003-08-03	237	304.9	2.5
2009-06-22	173	305.4	3.4
2009-09-10	253	302.3	2.4
2010-07-11	192	308.7	3.2
2010-07-18	199	305.6	2.8
2011-04-09	99	302.7	2.6
2011-05-11	131	303.0	2.7
2011-06-28	179	308.2	3.1
2011-09-07	250	304.8	2.7

Tabla 3.10 . Imágenes satelitales utilizadas para el estudio ICU.

La poca información reflejada en la TST media de cada una de las imágenes hace necesario un análisis de exploración de datos más profundo, para ello en la gráfica 1 se muestra un diagrama de cajas que resume las estadísticas las imágenes TST.

Este gráfico contiene rectángulos orientados de manera vertical. La parte superior y la inferior del rectángulo coinciden con el tercer cuartil y el primer cuartil de los datos almacenados de TST, y está dividido con una línea horizontal al nivel de la mediana (Figura 3.18). Se ha definido un paso 1.5 veces del rango intercuartil, dibujado con una línea vertical que se extiende desde la mitad de la parte superior de la caja hasta la mayor observación de TST que se encuentra dentro del paso, en caso de que un dato de TST decae más allá del paso los valores de TST son dibujados individualmente. De igual manera se dibuja en la parte inferior de la caja.

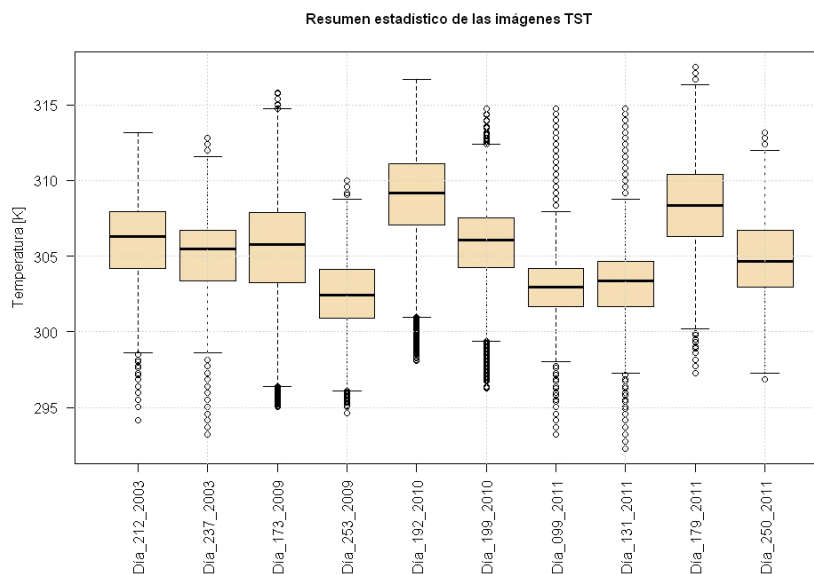


Figura 3.18 Resumen estadístico de las imágenes TST utilizadas para el estudio ICU.

Entre las conclusiones que se pueden realizar al observar el gráfico se observa que el día 10 de septiembre del 2009 (día juliano 253, 2009) muestra una clara disminución de la TST relacionada con los fenómenos meteorológicos del otoño. El día 9 de abril del 2011 (día juliano 99, 2011) presenta datos muy contiguos entre el primer y tercer cuartil, limitando el contraste entre zonas de alta temperatura y zonas de baja temperatura. Por último los días julianos de verano muestran una mediana de TST superior a los 305 grados Kelvin y una amplia diferencia entre máximas y mínimas.

El gráfico de cajas muestra unos datos atípicos en las imágenes TST, y esto se observa en la parte inferior de los datos. La gran cantidad de datos individuales de temperatura mínima que se presentan en todas las imágenes TST están asociados a la temperatura superficial de las parcelas agrícolas que se encuentran en la periferia urbana. De manera similar los datos individuales de TST con valores máximos están asociados a suelo desnudo sin edificar.

El resumen estadístico de diagrama de cajas presentado anteriormente muestra una idea global de la TST de las distintas imágenes, sin embargo es importante realizar un análisis detallado del comportamiento puntual de temperatura superficial. Solo de esta manera se logrará reconocer las relaciones entre la temperatura superficial y el medio urbano. Asimismo el identificar datos puntuales de información permitirá conocer si existe un patrón espacial entre imágenes de TST distintas fechas del año, o por el contrario si los cambios de TST están relacionados con las condiciones climatológicas. Para lograr este objetivo se han trazado ocho ejes que abarcan los principales barrios de la ciudad, cada eje está constituido por un conjunto lineal de puntos con una separación de 25 metros entre sí, y posteriormente se ha extraído el valor digital contenido en cada punto con información de TST (Figura 3.19).

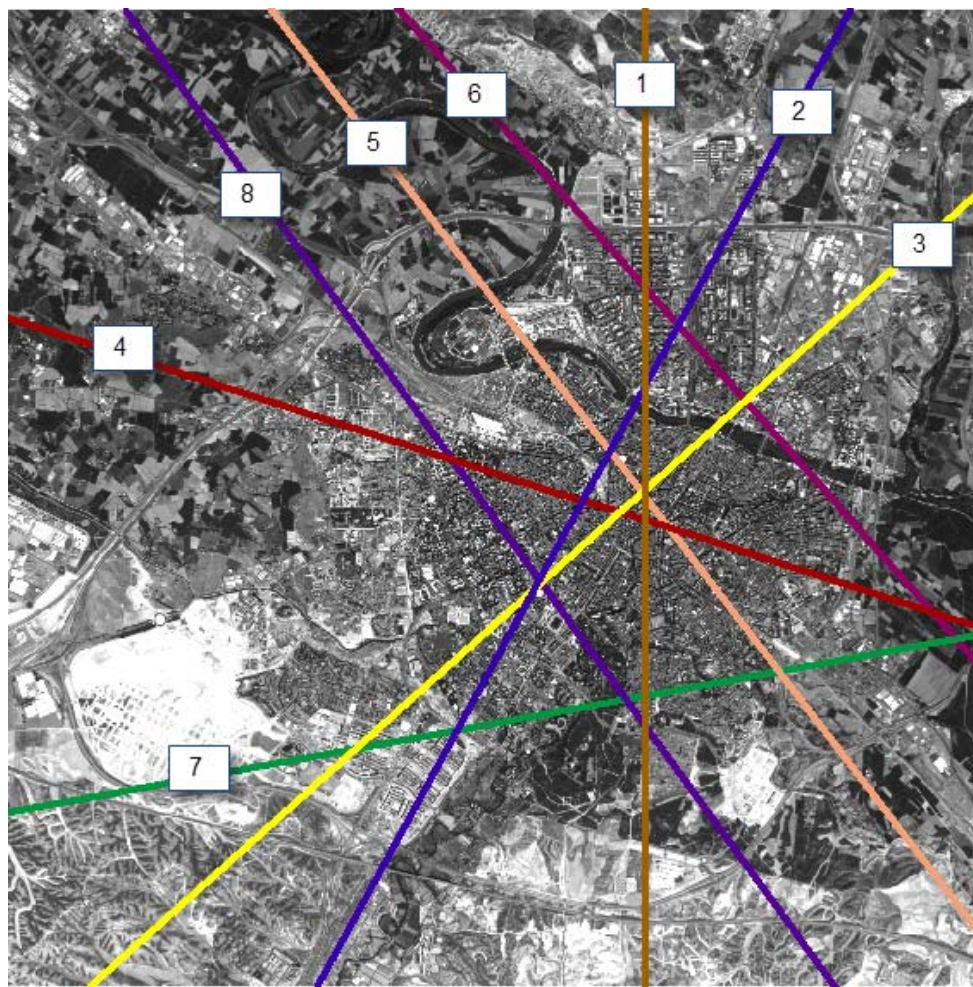


Figura 3.19 Recorridos de los ejes urbanos seleccionados.

3.8.2 Perfil TST en el entorno urbano.

El primer eje recorre la ciudad de Zaragoza de Norte a Sur, iniciando el recorrido en el campus ACTUR de la Universidad de Zaragoza y terminando en el parque comercial puerto Venecia en el barrio de Torrero. El segundo eje tiene un recorrido noreste-sudoeste partiendo en el barrio de Parque Goya y finalizando en el barrio de Valdespartera. El tercer eje realiza el recorrido Polígono Cogullada-Valdespartera. El cuarto eje atraviesa la ciudad de Oeste a Este desde barrio Miralbueno al barrio de Las Fuentes. El quinto eje parte del recinto de la Expo y finaliza en barrio San José. El sexto eje se enfoca en la margen derecha del Ebro iniciando en el ACTUR y dando fin en las Fuentes. El séptimo eje centra su atención en la parte sur de la ciudad comenzando en el barrio en proceso de construcción Arcosur y finalizando en el polígono de La Cartuja. Finalmente el octavo eje tiene un recorrido barrio Miralbueno-Parque Grande.

La extracción de los valores de TST sobre lugares puntuales permite observar el comportamiento de las distintas superficies urbanas. Ahora bien, si se realiza un seguimiento lineal de estos puntos, como se ha propuesto con el ochos ejes que cubren gran parte de la ciudad, es posible identificar diferencias de TST entre los

distintos barrios de la ciudad. Sin embargo para poder realizar este tipo de análisis se debe contemplar que las condiciones climáticas son diferentes a lo largo del año, y por lo tanto una superficie va a ver incrementada o disminuida su temperatura. La cuestión que se debe realizar es si el comportamiento de la TST está fuertemente relacionado con las condiciones espaciales del entorno urbano o por el contrario, las condiciones climatológicas predominan sobre las condiciones espaciales. Para responder la cuestión previa, se ha realizado un análisis estacional de las imágenes TST del año 2011, correspondientes a los días 9 de abril (día juliano 99); 11 de mayo (día juliano 131); 28 de junio (día juliano 179); y 7 de septiembre, 2011 (día juliano 250); y se han extraído los valores de TST a lo largo de los ocho ejes que cubren una gran diversidad de cubiertas urbanas y en menor medida cubiertas de cultivo.

De la figura 3.20 a la figura 3.27 se muestran los perfiles de temperatura superficial de los cuatro días en los que se dispone de una imagen de TST, sobre los ocho ejes que abarcan las distintas cubiertas urbanas. Se puede apreciar con claridad que los perfiles de TST de cada uno de los ejes que atraviesan la ciudad siguen un mismo patrón de TST.

Se observa con claridad que el día 28 de junio del 2011 presenta perfiles de TST elevados relacionados con un día típico de verano, el citado día presento una temperatura ambiente media de de 300K (26.3 °C) y una temperatura máxima de 310 K (37.5 °C). También se aprecia que son más marcadas las diferencias entre los valores máximos y mínimos de las distintas cubiertas urbanas.

Por otro lado los días 9 de abril del 2011; 11 de mayo del 2011; y 7 de septiembre del 2011; presentaron condiciones climáticas menos extremas con temperaturas medias de 294 (21.3 °C), 294 K (20.9°C), 297 K (23.8 °C) y temperaturas máximas de 305K (32.4 °C), 303 (29.4 °C), 305K (32.3 °C) respectivamente. Se puede considerar que existen los mismos patrones de TST en las distintas cubiertas urbanas independientemente del día del año, únicamente viéndose modificados los valores máximos y mínimos de TST de cada día del año.

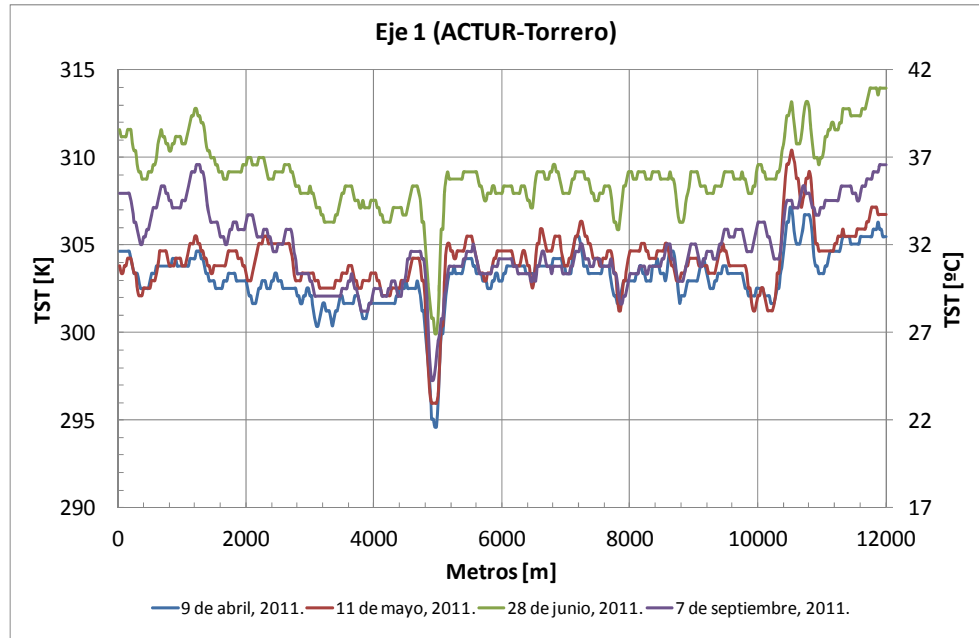


Figura 3.20 Análisis estacional de la TST, eje 1.

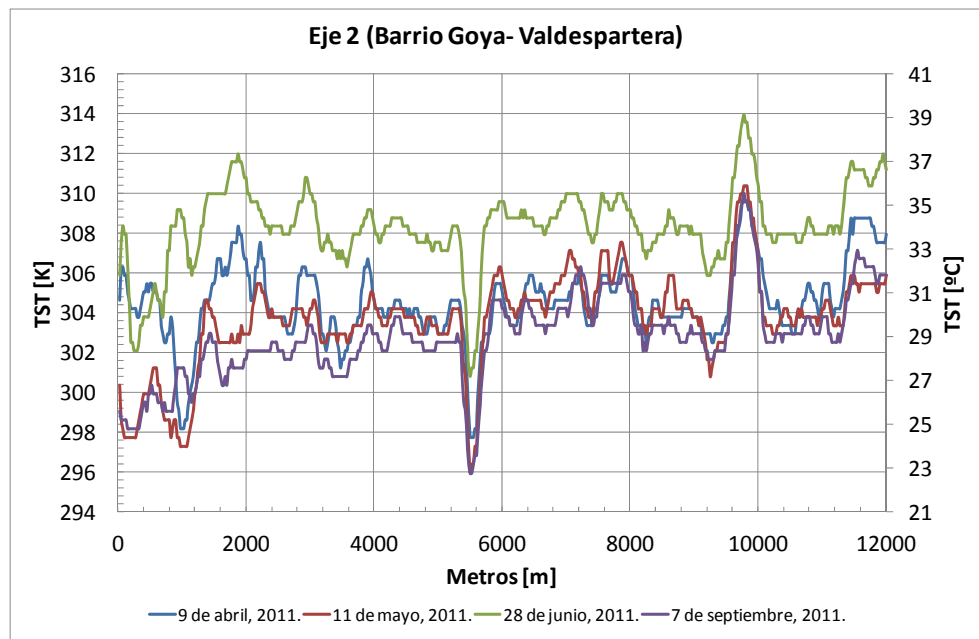


Figura 3.21 Análisis estacional de la TST, eje 2.

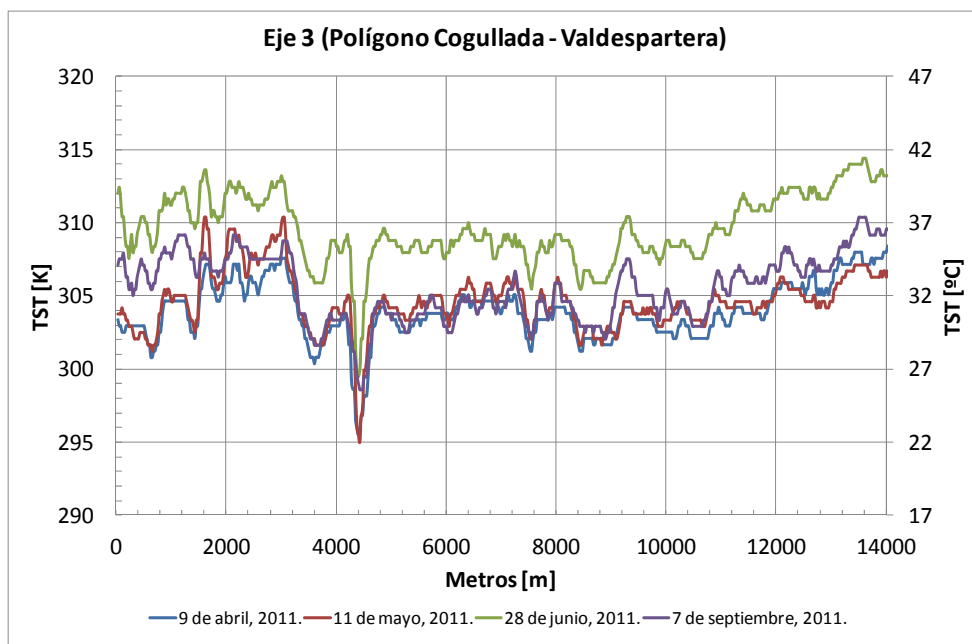


Figura 3.22 Análisis estacional de la TST, eje 3.

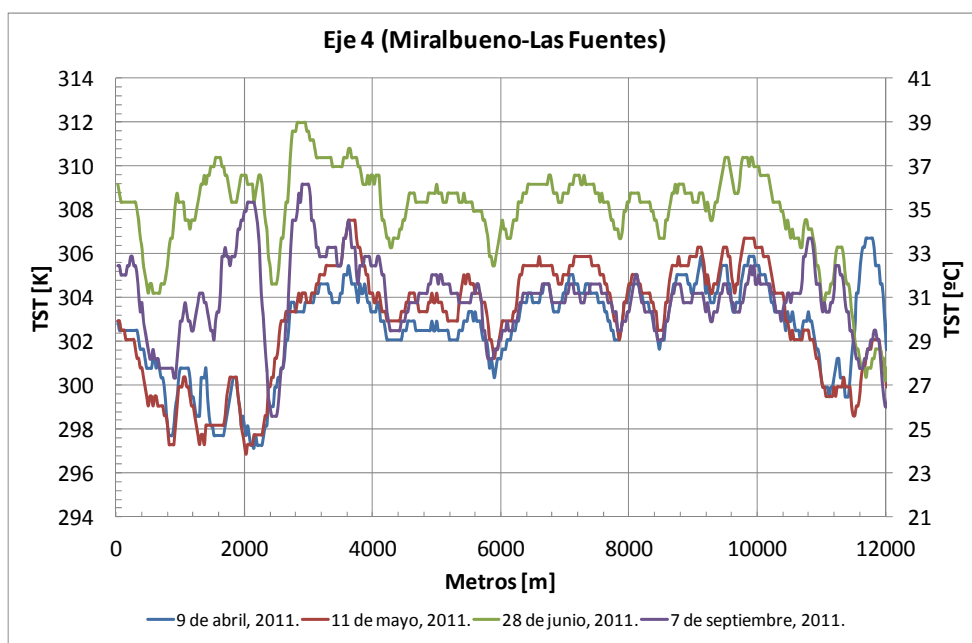


Figura 3.23 Análisis estacional de la TST, eje 4.

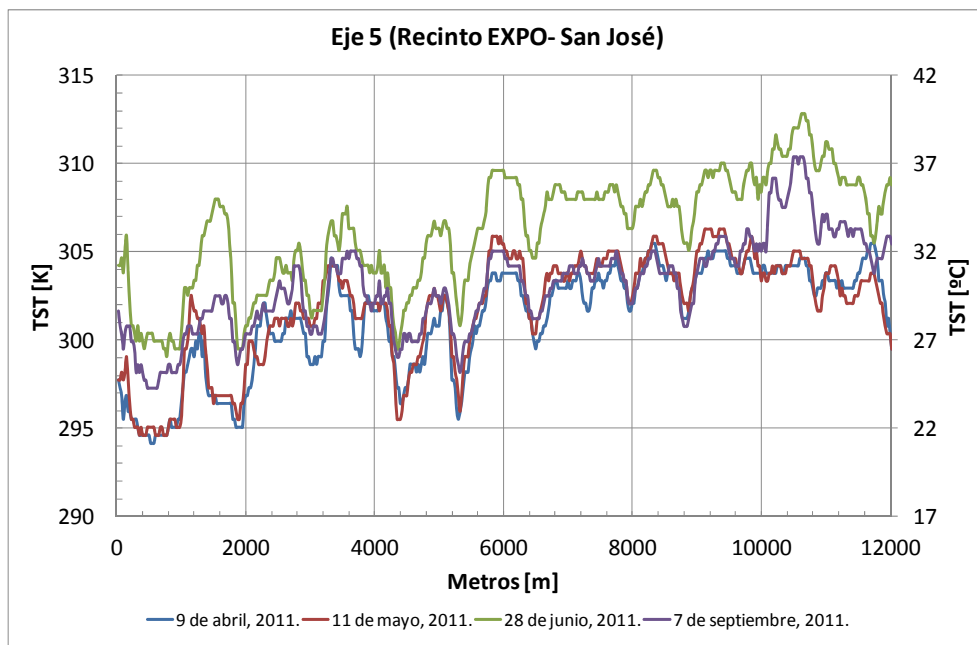


Figura 3.24 Análisis estacional de la TST, eje 5.

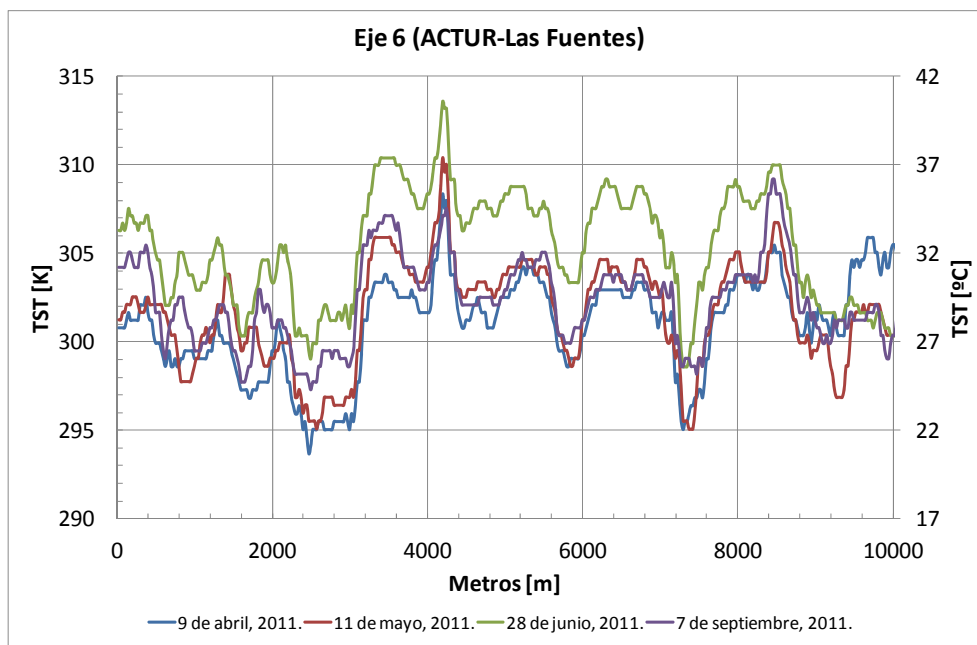


Figura 3.25 Análisis estacional de la TST, eje 6.

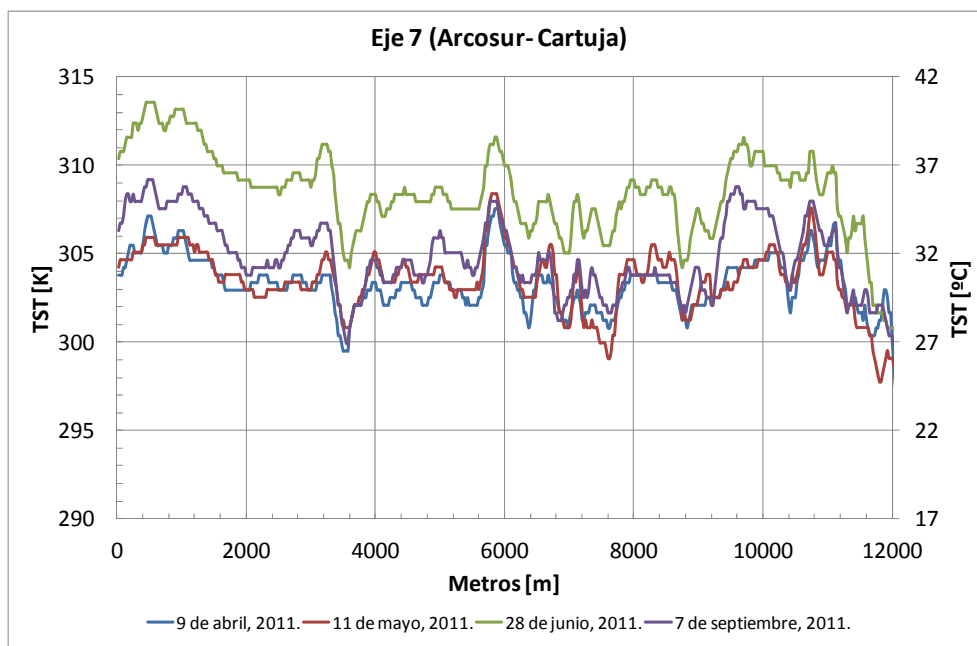


Figura 3.26 Análisis estacional de la TST, eje 7.

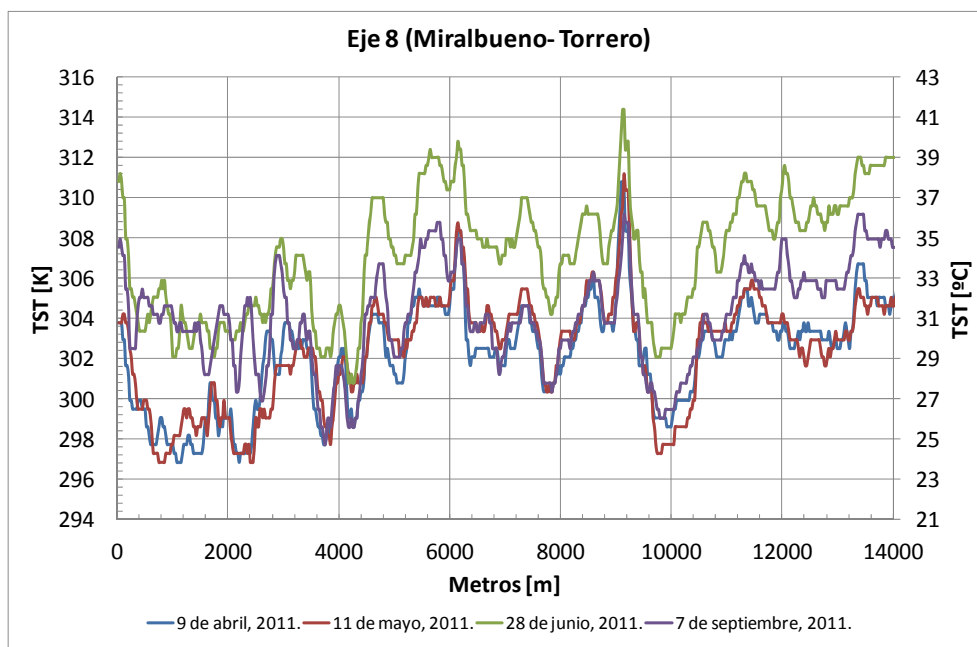


Figura 3.27 Análisis estacional de la TST, eje 8.

Aunque se presentan patrones similares de TST dependiendo del día del año, también existen pequeñas diferencias o cambios de patrón TST. Por lo que vale la pena reconocer las causas de estos cambios repentinos de TST que principalmente aparecen en el inicio y al final de cada una de las figuras que muestran el desarrollo de la TST a través de los distintos ejes que atraviesan la ciudad (Figuras 3.20 - 3.27). La respuesta de estos cambios de patrón es sencilla, el cambio de TST se debe a que hay un cambio significativo en la composición de las superficies propias de parcelas agrícolas.

Comprobar que existen patrones muy similares de TST en los distintos días del año 2011, hace pensar que los patrones espaciales influyen en gran medida en este resultado. Por lo que resulta de especial interés evaluar el comportamiento térmico superficial de los distintos barrios de Zaragoza, identificar la tipología de edificios que presentan elevadas temperaturas superficiales y reconocer barrios que al poseer vegetación ven reducida su TST. Para ello se han extraído los valores de TST del día 28 de junio del 2011 sobre los ocho ejes que se han trazado sobre Zaragoza, y posteriormente se ha relacionado el comportamiento térmico superficial con las distintas topologías urbanas, estas últimas identificadas con una imagen satelital de alta resolución (SPOT).

A continuación se realiza una descripción detallada del comportamiento térmico superficial de distintas cubiertas urbanas extrayendo la información de cuatro ejes representativos que atraviesan la ciudad de Zaragoza.

En el seguimiento de la TST sobre eje 1, con trayectoria ACTUR-Torrero, se identifica en primer lugar un edificio del sector terciario con una TST superior a la media, en concreto el campus ACTUR de la Universidad de Zaragoza; posteriormente se encuentra el barrio del ACTUR que está constituido por edificios de uso residencial y goza de gran cantidad de parques y jardines entre sus calles, siendo uno de los barrios con más baja TST de Zaragoza; el paso a la margen derecha del río Ebro es evidente por un claro descenso de la TST característico de un afluente; tanto la zona del Casco como el Centro presentan una TST cerca de 2 grados superior al ACTUR, atribuible a la falta de parques y jardines; el paso del eje 1 por el Canal Imperial se hace evidente por un claro descenso de la TST pero este es atribuible en mayor medida a la vegetación que existe sobre la rivera del Canal que al agua del canal, pues el Canal Imperial es muy pequeño para ser detectado por el sensor térmico; pasado el Canal Imperial se encuentra el barrio de Torrero que presenta los mismos niveles de TST que el Casco y Centro; finalmente en la parte Sur de la ciudad se identifica el parque comercial Puerto Venecia, en el mismo barrio de Torrero, donde se encuentran centros comerciales de gran escala (Figura 3.28).

La extracción de datos de TST a lo largo del eje 2 inicia reconociendo el comportamiento superficial entre parcelas agrícolas y suelo desnudo sin edificar; a continuación se encuentra el barrio de Parque Goya, presentando una TST un grado inferior con respecto al Centro; el paso por la autovía a Madrid presenta

aparentemente una elevada TST, sin embargo la elevada temperatura superficial es mayormente influenciado por un escampado de suelo desnudo aledaño a la autovía que a la misma autovía; el paso del eje 2 a lo largo del ACTUR, río Ebro y Casco presenta patrones muy similares a los valores extraídos por el eje 1 no obstante al paso del barrio Universidad se reconocen dos edificios del sector servicios asociados a un hospital clínico y a los edificios campus San Francisco de la Universidad de Zaragoza; el recorrido del eje 2 sigue por el barrio Romareda y el barrio Casablanca, este último característico por la disposición de edificios unifamiliares con superficies ajardinadas; posteriormente se detecta un cambio drástico de TST, llegando a temperaturas superficiales cercanas a los 314 K (41 °C) asociadas a edificios destinados al sector industrial; pasando el polígono industrial se encuentra el nuevo barrio de Valdespartera, barrio diseñado con criterios de urbanismo sostenible y arquitectura bioclimática, la TST de Valdespartera presenta una TST cercana a los 308K (35 °C), esto es 1 °C inferior a la encontrada en el Centro urbano sin embargo vale la pena mencionar al ser un barrio recién terminado la vegetación de los parques y jardines no ha llegado al final de su crecimiento; posterior a Valdespartera sobre la carretera a Valencia se encuentra otro conjunto de naves industriales que presenta valores de TST sumamente elevados (Figura 3.29).

En la descripción de los valores extraídos de TST a lo largo del eje 3, destaca nuevamente el alto valor de la temperatura superficial de los edificios destinados al sector industrial reflejados en el Polígono Industrial Cogullada, ahora bien, gran parte de este polígono industrial está destinado a almacenes y recuperadoras de chatarra por lo que se puede asumir que las altas temperaturas superficiales están asociadas a las cubiertas metálicas que poseen las naves industriales; seguidamente se encuentra un parque que palia las altas temperaturas reduciendo cerca de 6 grados la temperatura superficial respecto a la obtenida en el polígono industrial; el barrio Arrabal presenta TST similares a al Casco y al Centro, por lo que se puede suponer la escasa vegetación entre sus calles, por el contrario los barrios de Casablanca y en menor medida Valdespartera muestra una disminución de la TST asociada a una mayor cantidad de parques y jardines. Por último, los valores extraídos de TST del eje 3 corroboran que el suelo desnudo sin edificar arroja altos valores de TST (Figura 3.30).

El cuarto eje atraviesa la ciudad del barrio de Miralbueno al barrio de Las Fuentes, la extracción de valores TST inicia reconociendo una TST elevada vinculada al Centro Deportivo Municipal (C.D.M) Miralbueno; seguidamente la presencia de áreas verdes en el barrio Oliver y entre los barrios Oliver y Delicias es reflejado con un notorio decremento de la TST; de la misma manera se aprecia un pequeño decremento de la TST entre las superficies edificadas y las plazas ajardinadas (Figura 3.31).

En el perfil del eje 5 se aprecia la alta variabilidad de TST entre parcelas agrícolas, dependiendo del ciclo fenológico cultivado; una vez pasado el río Ebro, se aprecia el impacto en la TST del recinto EXPO construido en el año 2008, cabe la pena

mencionar que anterior al recinto existían parcelas agrícolas; dejando atrás el recinto EXPO y una vez pasado el río Ebro se detecta una alta presencia de TST vinculada a un C.D.M del barrio Almozara; finalmente entre los barrios Almozara, Centro y San José se aprecia nuevamente la presencia de parque y jardines con un notorio decremento de la TST (Figura 3.32).

Los valores máximos de TST del eje 6 están asociados a edificios de uso comercial en la parte medular del barrio del ACTUR, mientras que los valores mínimos están directamente relacionados con la presencia de un parque en el barrio del Arrabal y al paso del río Ebro por la ciudad (Figura 3.33).

Los contrastes entre altos valores de TST y bajos valores de TST se reconocen nuevamente en el eje que cruza el Sur de Zaragoza de poniente a oriente, por una parte los polígonos industriales presentan altos patrones de la TST mientras que los parques y jardines muestran un decremento la misma (Figura 3.29).

Por último en el eje que inicia su recorrido en el barrio de Miralbueno y termina en el barrio de Torrero se detectan edificios con altos valores de TST, en concreto un conjunto de edificios comerciales y edificio destinado al sector servicios. En el otro extremo se observa el beneficio térmico que trae el Parque Grande (Parque José Antonio Labordeta), que gracias a su extensión, ve reducida la TST incluso más que los demás parques de Zaragoza (Figura 3.30).

Este análisis cualitativo refleja de manera clara el papel de las distintas superficies en la estructura de valores de TST. Queda, sin embargo, el paso decisivo de evaluar si la TST sigue un patrón temporal a lo largo del tiempo. Todo ello se ataca en la sección siguiente.

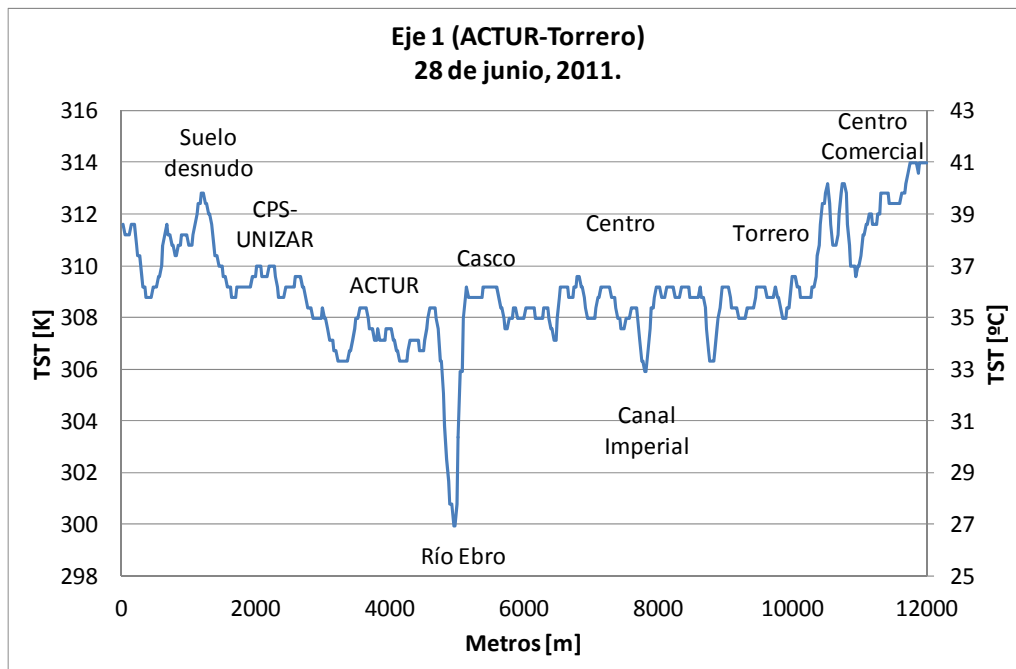


Figura 3.28 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 1.

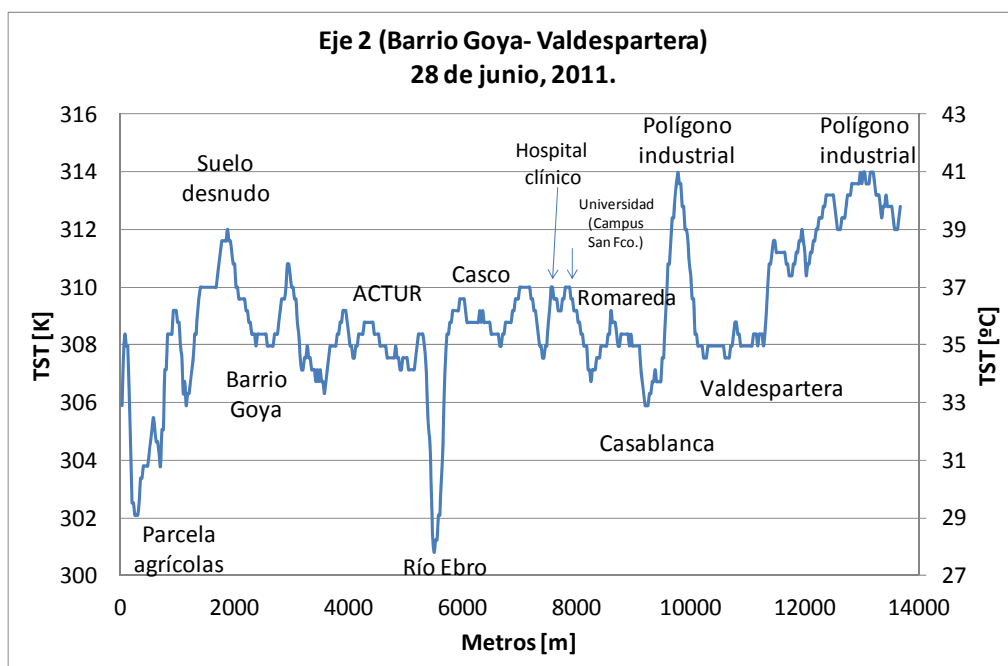


Figura 3.29 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 2.

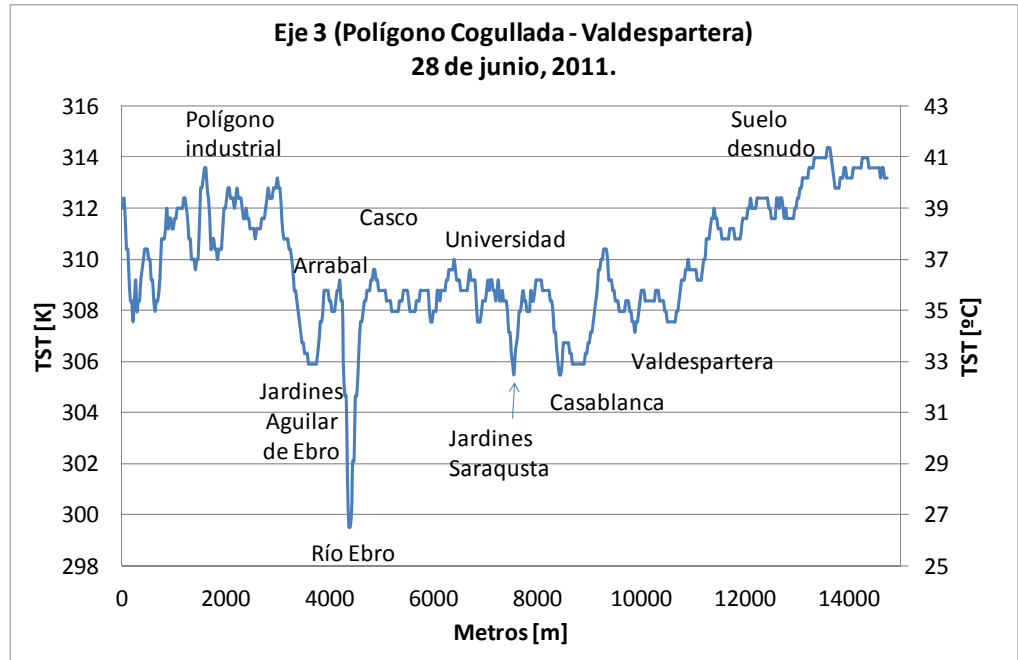


Figura 3.30 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 3.

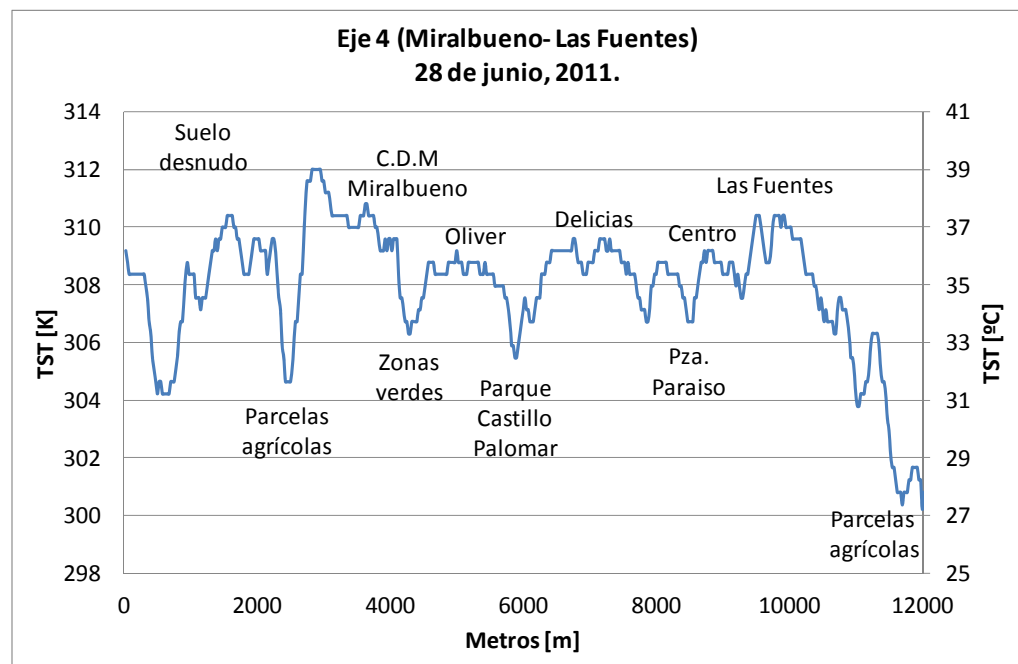


Figura 3.31 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 4.

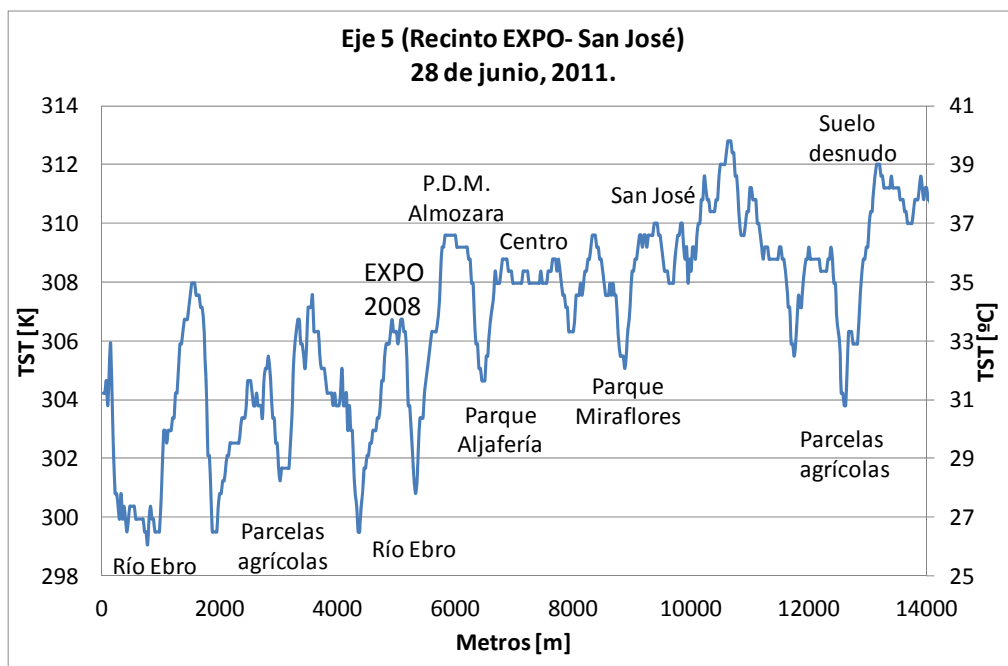


Figura 3.32 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 5.

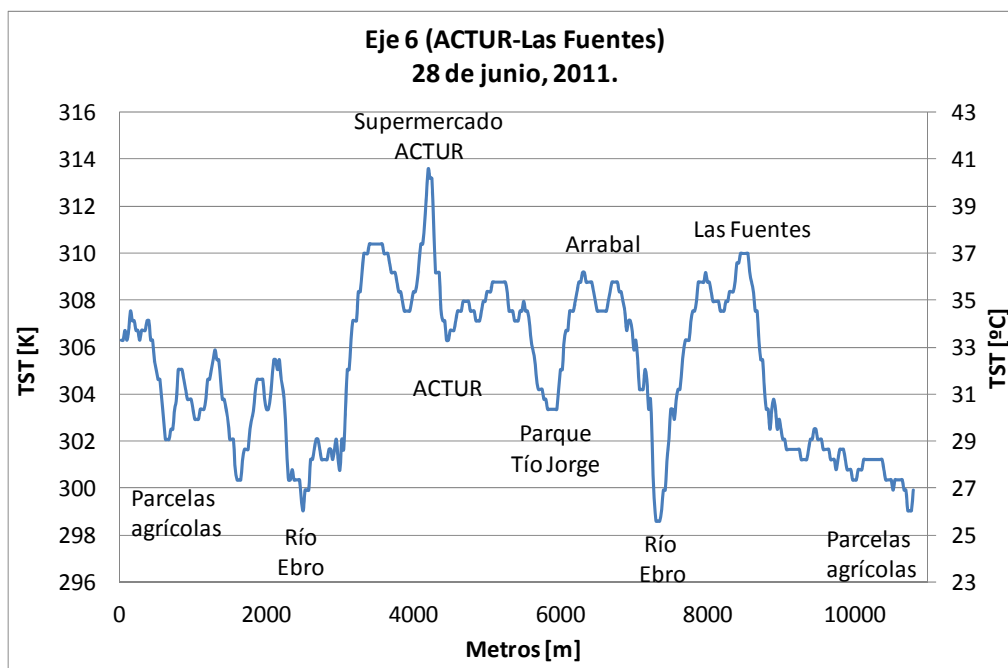


Figura 3.33 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 6.

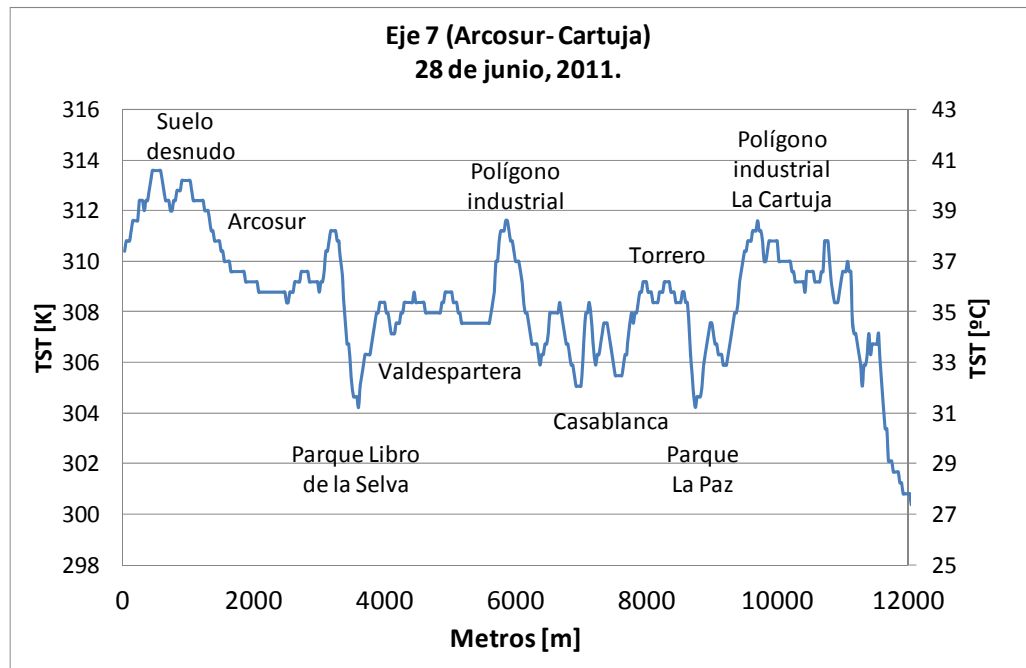


Figura 3.34 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 7.

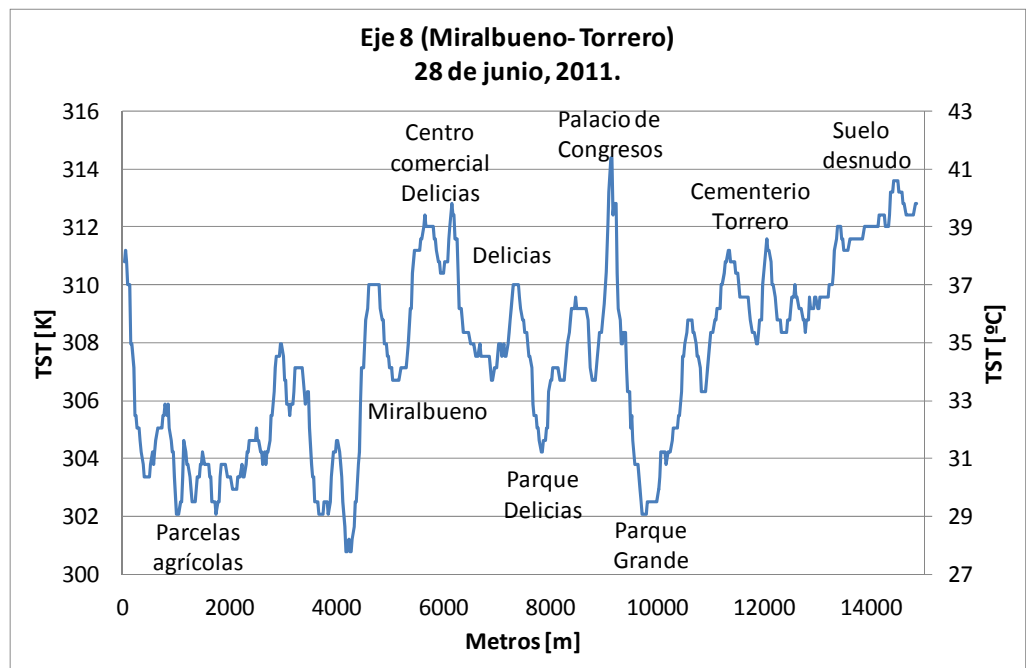


Figura 3.35 Inspección de TST en barrios y superficies urbanas, eje 8.

3.9 Aplicaciones en teledetección del Análisis de Componentes Principales.

El análisis estadístico multivariable por análisis de componentes principales (ACP) se ha aplicado en teledetección para la compresión de datos (Ready et al., 1972), decodificación de imágenes (González et al. 1977), detección de cambios en estudios multitemporales (Byrne et al. 1980), mejora de imágenes (Richards et al., 1986), y para clasificar distintos tipos de cubiertas vegetales. (Fung et al., 1987)

Razón por la cual es atractivo realizar este método de análisis estadístico para evaluar el comportamiento multitemporal de la TST, así como los índices de vegetación urbana en la ciudad de Zaragoza.

Para llevar a cabo el ACP es imprescindible determinar la matriz de covarianza o la matriz de correlación de los datos asociados al estudio. El uso de la matriz de covarianza o la matriz de correlación ha sido ampliamente discutido en la literatura, siendo discutido por primera vez por Singh et al. (1985). Posteriormente Fung et al. (1987) y Eastman et al. (1993) han argumentado que utilizar la matriz de correlación es superior a la matriz de covarianza cuando se realiza una clasificación de imágenes. En otro trabajo Eklundh (1993) realizó un análisis tanto multispectral como un análisis multitemporal de diversas imágenes satelitales para comparar que tipo de matriz (covarianza o correlación) era la más adecuada para realizar ACP aplicado a la teledetección. En el estudio ACP multispectral (unitemporal) se comenzó por evaluar las componentes sin estandarizar (matriz de covarianza) generando como resultado una primera componente que explica en gran medida la varianza explicada con la problemática que las restantes componentes son ruido de la imagen. Por el contrario el ACP multispectral realizado con las componentes estandarizadas (matriz de correlación) se producen varianzas uniformes en todas las componentes disminuyendo el ruido de la imagen. Por otro lado si se realiza un estudio multitemporal, de acuerdo con Eklundh (1993), también es preferible utilizar las componentes estandarizadas ya que aumenta el rendimiento de la varianza explicada en cada componente al disminuir el ruido de las imágenes.

3.9.1 Análisis Componentes Principales como método de análisis multitemporal TST.

El observar patrones de TST en a lo largo del tiempo invita a realizar un ACP. El ACP presenta una visión de las interrelaciones entre variables y juega un papel importante en el resumen y la reducción de datos. Desde la perspectiva del resumen de datos de la TST, el ACP proporciona una comprensión clara de que patrones de temperatura pueden actuar de manera similar en todas las imágenes, y que patrones de temperatura realmente tienen un alto impacto para el futuro análisis multivariante (Sanginés et al., 2012).

El diseño de ACP implica seleccionar las imágenes TST que cumplen las condiciones de nula nubosidad y condiciones meteorológicas estables, para extraer sus correspondientes cargas factoriales con el fin de comprender las diferencias entre varianzas. Una vez que se especifican las imágenes de TST y se prepara la matriz de cargas factoriales, es posible aplicar un análisis factorial para identificar la estructura subyacente de relaciones entre varianza (cargas factoriales o eigenvectores).

Los eigenvectores (cargas factoriales) establecen las cargas de cada variable identificando la estructura subyacente de las variables. En este caso las cargas factoriales (eigenvectores) establecen la mejor combinación que explica el mayor porcentaje de varianza de los datos de TST.

Por otro lado los eigenvectores representan el factor de escala por el que ha sido multiplicada cada carga factorial. En nuestro caso los eigenvectores contienen la información relativa al poder explicativo de cada factor, y está representada por la desviación estándar. Por lo tanto la matriz de eigenvectores también se puede expresar en términos de varianza explicada, y se obtendrá una indicación preliminar acerca del número de factores a extraer. Dicho en otras palabras es posible obtener el porcentaje de la variable explicada de cada uno de los factores.

Ahora bien, existen dos maneras diferentes de realizar un ACP. La primera de ellas considera extraer las cargas factoriales de la matriz de covarianza, realizar esta operación significa considerar cada variable (imagen TST) con un peso absoluto, es decir que las variables guardan independencia entre sí y los datos están sin estandarizar. Este método para extraer cargas factoriales no es adecuado en un estudio multitemporal debido a que su construcción es producto de distintos días. La segunda manera de realizar un ACP consiste en extraer las cargas factoriales de una matriz de correlación (Tabla 3.11). Dicha matriz de correlación considera cada una de las variables con un peso relativo. En otras palabras, la matriz de correlación estandariza los datos de la matriz de covarianza. Realizar la extracción de cargas factoriales a través de una matriz de correlación es el método adecuado para estudios multitemporales como lo es el análisis de la TST debido a que la información proporcionada en los distintos días de captura es agrupada de manera homogénea.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENÉRGICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.

Matriz de correlación.

Día	2003-07-31	2003-08-03	2009-06-22	2009-09-10	2010-07-11	2010-07-18	2011-04-09	2011-05-11	2011-06-28	2011-09-07
2003-07-31	1.00	0.91	0.78	0.72	0.76	0.72	0.73	0.74	0.77	0.72
2003-08-03	0.91	1.00	0.77	0.69	0.74	0.69	0.71	0.72	0.75	0.70
2009-06-22	0.78	0.77	1.00	0.86	0.88	0.83	0.79	0.80	0.86	0.81
2009-09-10	0.72	0.69	0.86	1.00	0.85	0.83	0.73	0.73	0.82	0.82
2010-07-11	0.76	0.74	0.88	0.85	1.00	0.92	0.83	0.82	0.88	0.81
2010-07-18	0.71	0.69	0.83	0.83	0.92	1.00	0.79	0.79	0.86	0.81
2011-04-09	0.73	0.71	0.79	0.73	0.83	0.79	1.00	0.88	0.79	0.74
2011-05-11	0.74	0.72	0.80	0.73	0.82	0.79	0.88	1.00	0.80	0.71
2011-06-28	0.77	0.75	0.86	0.82	0.88	0.86	0.79	0.80	1.00	0.90
2011-09-07	0.72	0.70	0.81	0.82	0.81	0.81	0.74	0.71	0.90	1.00

Tabla 3.11 Matriz de correlación de las diez imágenes utilizadas TST del estudio ICU para la ciudad de Zaragoza, España.

Cargas factoriales.

Día	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6	C.7	C.8	C.9	C.10
2003-07-31	-0.30	0.58	-0.13			-0.17		0.59	0.40	
2003-08-03	-0.29	0.64	-0.12					0.57	-0.37	
2009-06-22	-0.32		-0.13	0.31	-0.25	0.68	-0.35	0.13	0.29	-0.10
2009-09-10	-0.31	-0.23	-0.27	0.39	-0.59	-0.38	0.27		-0.17	
2010-07-11	-0.33	-0.19		0.27	0.35		-0.20	0.14	-0.30	0.70
2010-07-18	-0.32	-0.28		0.23	0.60	-0.24	0.10	0.21	0.30	-0.42
2011-04-09	-0.31		0.58	-0.19	-0.22	-0.33	-0.56			-0.19
2011-05-11	-0.31		0.60			0.23	0.63		0.14	0.17
2011-06-28	-0.32	-0.14	-0.16	-0.37	0.14	0.32	0.11	0.40	-0.50	-0.38
2011-09-07	-0.31	-0.21	-0.37	-0.65	-0.10	-0.11		0.25	0.32	0.30

Tabla 3.12 Cargas factoriales obtenidas a partir de la matriz de correlación.

La primera componente principal tiende a ser un factor general por el que casi todas las imágenes TST se ven afectadas dando cuenta del mayor porcentaje de varianza. El segundo y siguientes componentes se basan en la varianza residual, donde cada uno de las componentes explica porcentajes de varianza cada vez menores (Figura 3.36).

Una herramienta importante para poder interpretar los factores es aplicar su correspondiente rotación de factores. El objetivo de rotar los factores es obtener las cargas factoriales más significativas de cada componente. Con la rotación de componentes principales, se obtiene una agrupación de imágenes TST altamente influenciadas por la primer componente principal (ACP1); por otro lado, se reconoce un grupo de imágenes TST que en mayor medida son explicados por la segunda componente principal ACP2; y de igual manera son agrupadas las imágenes TST restantes de acuerdo a su grado influencia en cada componente principal.

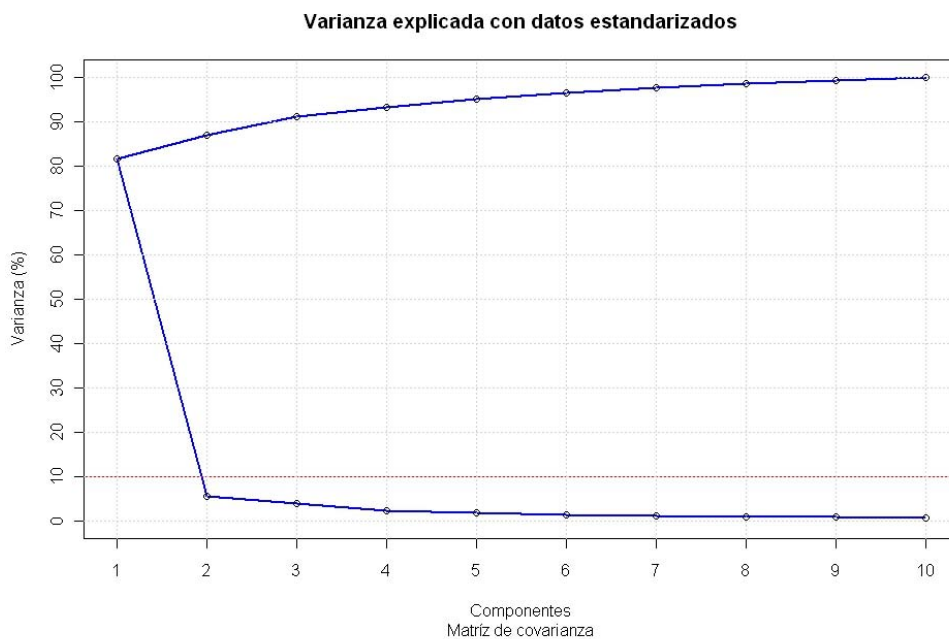


Figura 3.36 Varianza explicada de las cargas factoriales extraídas por la matriz de correlación.

El caso más simple de rotación, es la rotación ortogonal, en la que los ejes de los componentes principales se rotan un ángulo de 90 grados. En concreto, en el análisis de ACP de las imágenes de TST se utilizó la rotación VARIMAX, que se centra en simplificar la matriz de las cargas factoriales. Con la aproximación rotacional VARIMAX, se alcanza la máxima simplificación escalando las cargas factoriales en ceros y unos; la alta influencia de una imagen TST (alta carga factorial) sobre una componente tiene valores cercanas a -1 o 1, indicando así una clara asociación positiva o negativa entre la TST y el factor; por el contrario, si las cargas factoriales tienen valores a 0, significa que tienen muy baja o nula influencia sobre cada componente principal.

En la tabla 3.13, figura 3.37 y figura 3.38 se muestran las nuevas cargas factoriales tras haber rotado la matriz de correlación. Se han simplificado los resultados a las cuatro componentes principales con mayor grado de varianza explicada ya que estas cuatro componentes explican el 94.3% del total de las imágenes TST (Figura 3.36). Un primer análisis permite concluir que la agrupación de las imágenes TST se realiza de manera temporal, agrupando en la primer componente principal las imágenes de finales del 2009 y principios del 2010; la segunda componente principal agrupa las imágenes correspondientes al 2003; la tercer componente principal está fuertemente influenciada por los días 9 de abril y 11 de mayo del año 2011; y la cuarta componente está altamente influenciada de manera negativa por los días del 28 de junio y 7 de septiembre del 2011.

Día	PCA.1	PCA.2	PCA.3	PCA.4
2003-07-31		0.67		
2003-08-03		0.72		
2009-06-22	-0.45	0.13		
2009-09-10	-0.59		-0.18	
2010-07-11	-0.46		0.11	
2010-07-18	-0.47	-0.10		
2011-04-09			0.68	
2011-05-11			0.68	
2011-06-28				-0.53
2011-09-07				-0.83

Tabla 3.13 Cargas factoriales tras aplicar la rotación VARIMAX a las cargas factoriales de la matriz de correlación.

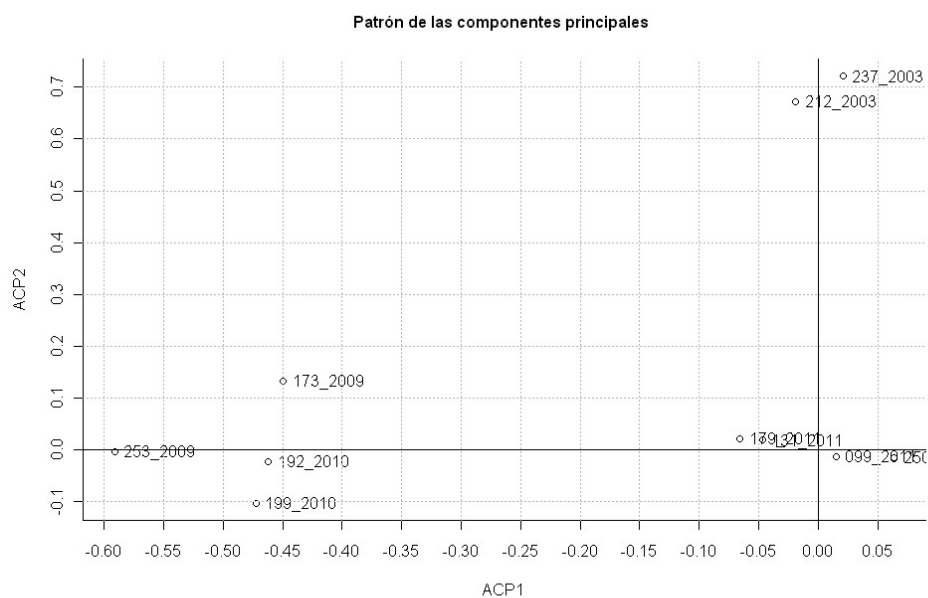


Figura 3.37 Agrupamiento de imágenes TST mediante rotación VARIMAX, 2009-2010 y 2003.

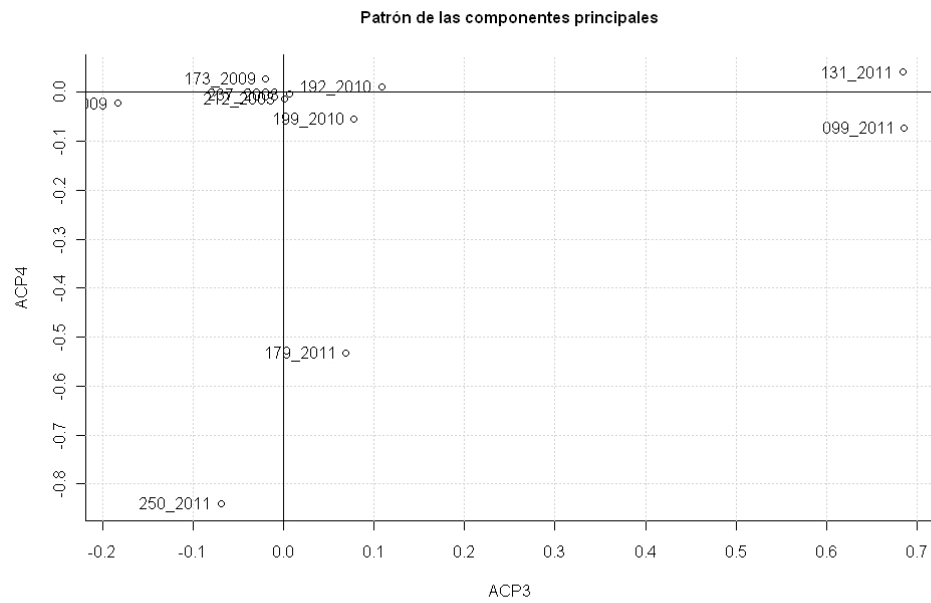


Figura 3.38 Agrupamiento de imágenes TST mediante rotación VARIMAX, 1er y 2do semestre 2011.

El principal patrón del comportamiento de la TST en el medio urbano de Zaragoza está representado por la primer componente principal explicando el 81.6% de la varianza explicada del total de las 10 imágenes TST. Siendo los días del 22 del 2009 (Día juliano 173); 10 de septiembre de 2009 (Día juliano 253); 11 de julio del 2010 (Día juliano 192); y 18 de julio del 2010, los que aportan la mayor influencia en la nueva imagen de TST. (Figura 3.39)

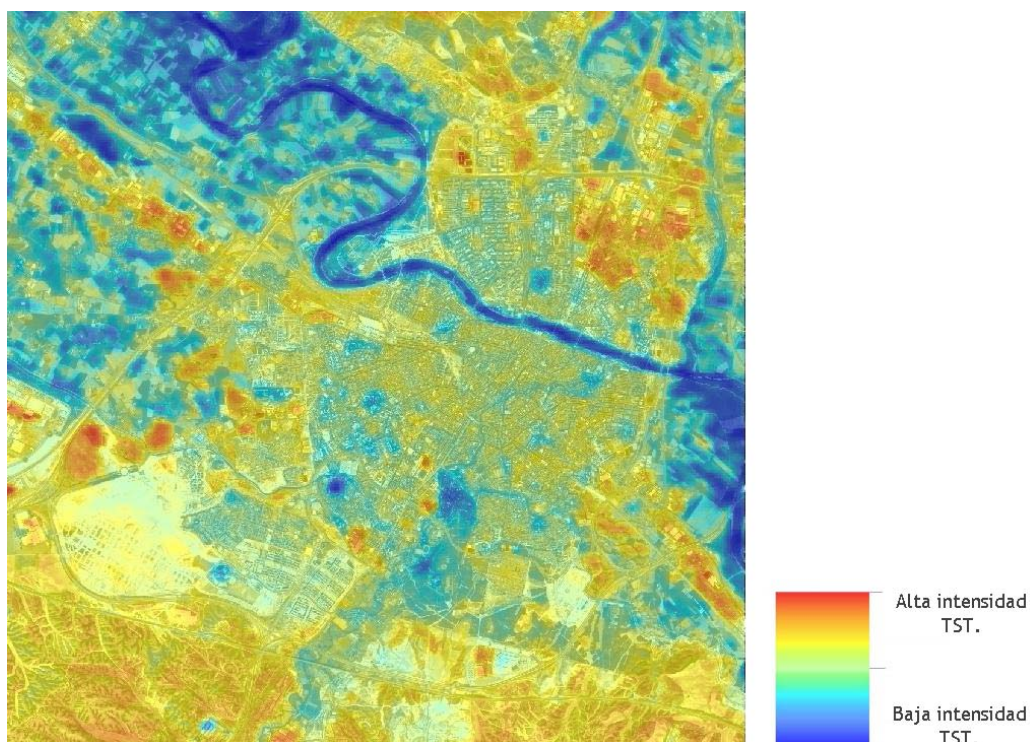
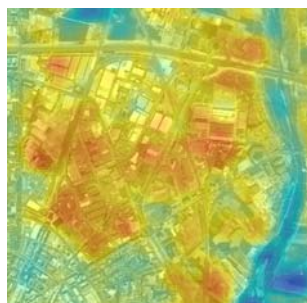


Figura 3.39 Principal patrón de TST explicado por la primer componente principal (ACP1).

La imagen de la ACP1 permite observar que el sector nororiental de la ciudad presenta un patrón de TST elevado y este está altamente relacionado con la el polígono industrial Cogullada; al igual que el sector suroriental y noroccidental que coinciden con los polígonos industriales de La Cartuja y Miralbueno, respectivamente. En la figura 3.40 se muestra el detalle del patrón de TST de los polígonos industriales de Zaragoza.

Por otra parte existen zonas puntuales que presentan una alta TST, por ejemplo la parte medular que divide el barrio del ACTUR presenta valores superiores de TST coincidentes con edificios destinados al uso comercial, de la misma que en la parte oriental y occidental del barrio se localizan centros educativos y polideportivos. El mismo comportamiento puntual de alta TST se encuentra en el barrio Romareda donde se localiza un edificio destinado a la sanidad pública y un auditorio municipal. El mismo patrón se observa en el barrio Torrero con la presencia de un centro comercial y en el barrio de Parque Goya con la disposición de un centro deportivo y

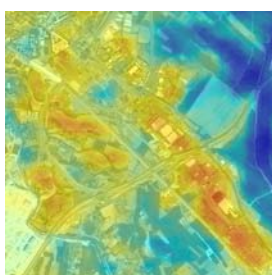
un centro universitario. También cabe destacar que la presencia de suelo desnudo sin edificar presenta altos patrones de TST (Figura 3.41).



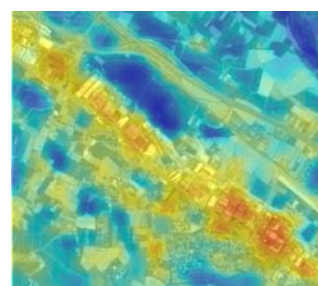
a) Polígono industrial Cogullada.



b) Polígono industrial Valdefierro.



c) Polígono industrial La Cartuja.



d) Polígono industrial Miralbueno.

Figura 3.40 Detalle del patrón de TST (ACP1) de los polígonos industriales de Zaragoza.



a) Edificios comerciales, polideportivos y centros educativos.



b) Edificios sector servicios.



c) Edificio comercial.



d) Centro deportivo.

Figura 3.41 Detalle del patrón de TST (ACP1) de edificios del sector terciario.

En contraste los patrones de baja TST se presentan en las zonas de parques y jardines como por ejemplo El Parque Grande, el parque del barrio Almozara, el parque Oriente en el barrio de La Jota, el parque Delicias ó el parque Bruil localizado en el barrio de Las Fuentes (Figura 3.42).

De la misma manera, el agua presenta bajos patrones de TST observables en el cauce del río Ebro y Gállego; en el canal Imperial; en la depuradora de agua presente en el barrio Casablanca; y en los estanques de agua de algunos parques, como se presentan en el parque Libro de la Selva en Valdespartera o el estanque del Tío Jorge en el barrio Almozara. Por último, también se aprecia una baja TST en las parcelas agrícolas que se encuentran en la periferia urbana.



a) Parque Grande



b) Parque Oriente



c) Parque Delicias



d) Parque Bruil



e) Parque Libro de la selva



f) Parque Tío Jorge

Figura 3.42 Detalle del patrón TST (ACP1) de parques y jardines.

La imagen de ACP2 (Figura 3.43) está alta influenciada por las imágenes TST del año 2003, observándose un segundo patrón de temperatura superficial. En comparación con la imagen ACP1 se aprecia que se presentan pautas espaciales bien definidas y patrones de TST similares en ambas imágenes. Por ejemplo se observa el mismo patrón de TST en las zonas industriales de los polígonos de Cogullada, Valdefierro, Cartuja y Miralbueno. Al igual que en los edificios destinados al sector terciario.

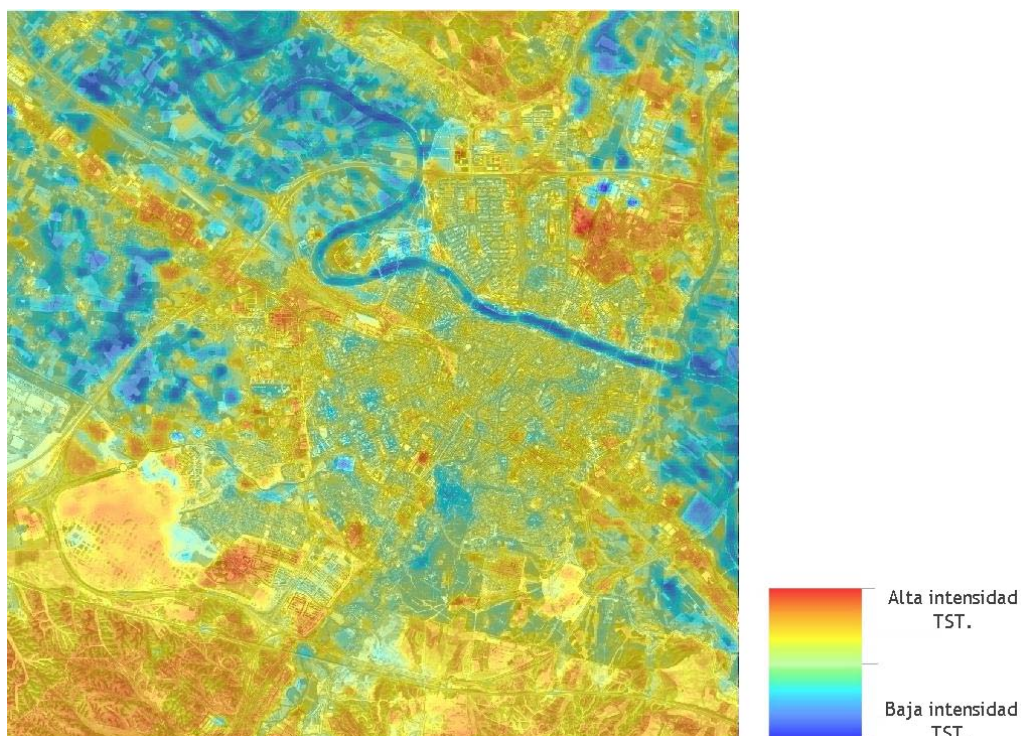


Figura 3.43 Segundo patrón de TST explicado por la segunda componente principal (ACP2).

Sin embargo se presenta un cambio significativo en otras regiones de la ciudad, por ejemplo, en la parte suroccidental de la ciudad. El motivo de este alto contraste de temperatura superficial es debido a que en el 2003 los barrios de Valdespartera y Arcosur no existían. En aquel entonces únicamente se había comenzado con un nivelado del terreno de dichos barrios, y en algunos casos existían parcelas agrícolas. Esto se puede corroborar con la ortófotografía proporcionada por el PNOA el año del 2003 (Figura 3.44).



Figura 3.44 Evolución de los barrios de Valdespartera y Arcosur (2003 y 2010).

El tercer patrón de TST asociada principalmente al comportamiento de la TST de los días 9 de abril 2011 y 11 de mayo se presenta en la figura 3.45. En términos generales se siguen los mismos patrones de TST obtenidos en el ACP1 y el ACP2, por ejemplo se siguen manteniendo las altas temperaturas superficiales en las zonas de la ciudad donde se encuentran los polígonos industriales, de igual manera que se presenta el mismo patrón de alta temperatura en las superficies asociadas con edificios de uso comercial y del sector servicios. No obstante al observar con detalle la imagen ACP3 y comparándola con la imagen ACP2, permite notar un cambio significativo de TST en los barrios de Arcosur y Valdespartera. Para comprender dicho cambio, en la figura 3.44 se presenta una imagen SPOT de alta resolución del 28 de agosto del 2010, como se puede apreciar en la imagen SPOT, la urbanización de Valdespartera se encuentra finalizada y el futuro barrio de Arcosur está en proceso de construcción. Lo que hace evidente suponer que el cambio de la TST entre la imagen ACP2 y la imagen ACP3 es debido al cambio de uso de suelo.

El patrón de TST proporcionado por la imagen ACP4 (Figura 3.46), expresada principalmente por los días 28 de junio y 7 de septiembre del 2011, confirma que los patrones de temperatura superficial es influenciado por las características espaciales de la ciudad y en menor medida por las condiciones atmosféricas que se presentan a lo largo del año.

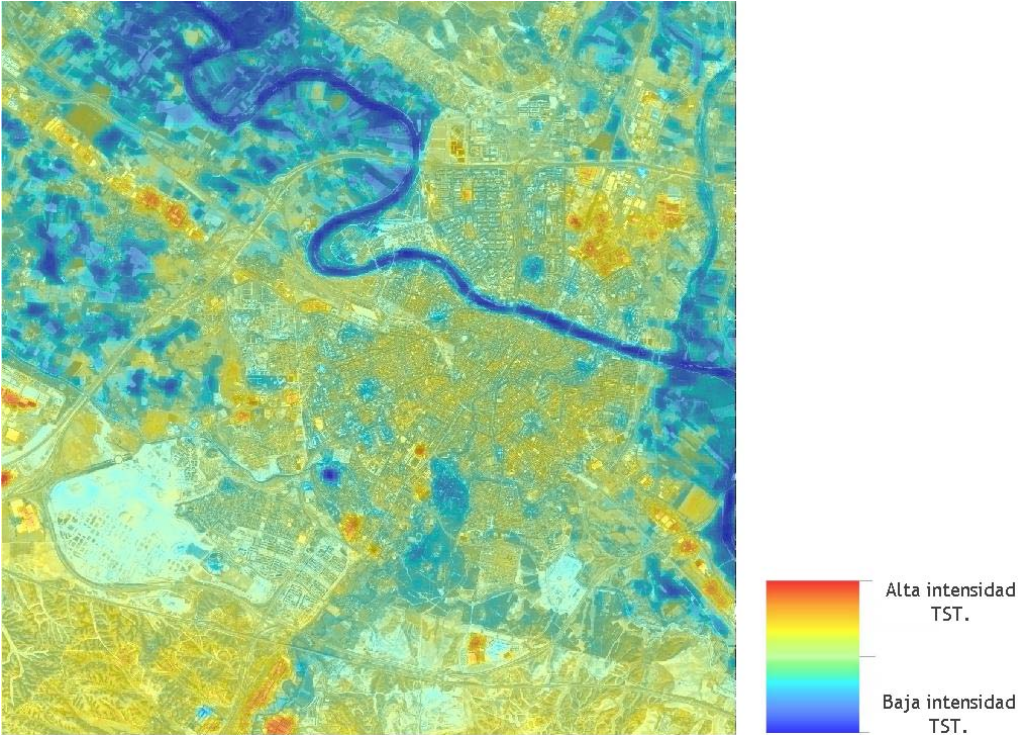


Figura 3.45 Tercer patrón de TST explicado por la cuarta componente principal (ACP3).

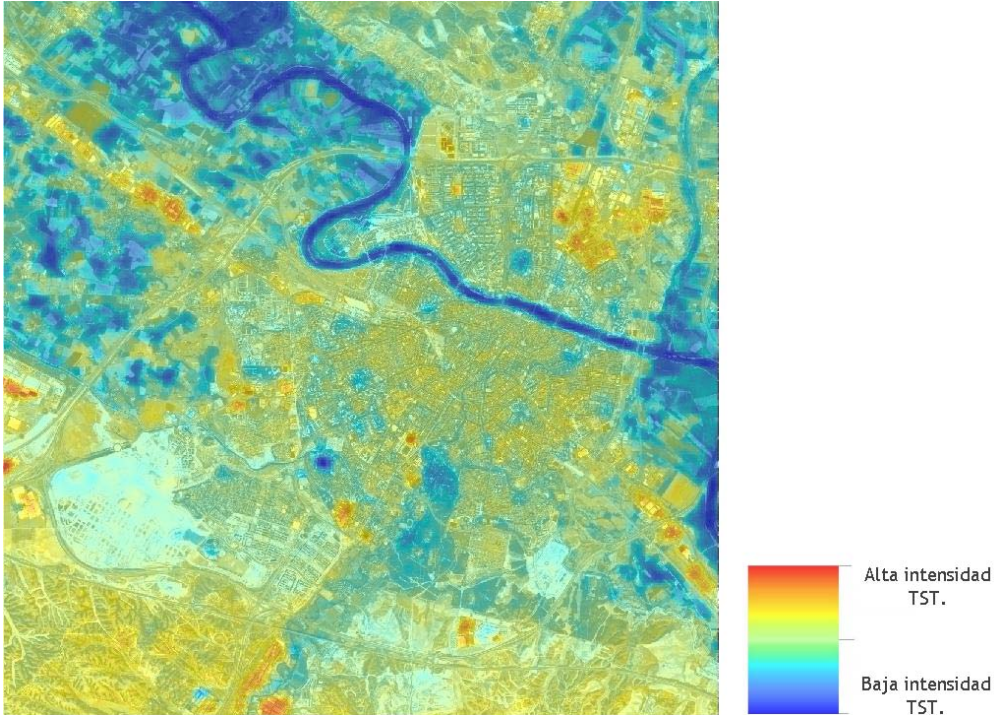


Figura 3.46 Cuarto patrón de TST explicado por la cuarta componente principal (ACP4).

3.10 Vegetación en el medio urbano.

El análisis de la TST ha permitido observar que la presencia de parques y jardines disminuye la temperatura superficial entre 5 y 7 grados con respecto a otro tipo de superficies urbanas, por lo que se puede concluir que la vegetación en el entorno urbano contribuye en buena medida en la reducción del efecto ICU. Sin embargo, hay dos consideraciones que tener en cuenta antes de dar válida esta conclusión. La primera de ellas es que la relación entre TST y vegetación se ha hecho mediante inspección visual comparando las imágenes TST con una imagen satelital de alta resolución SPOT (Figura 3.19). La segunda de ellas es que la TST es producto la estimación de la temperatura mediante con una corrección de la emisividad (Ecuación 3.13), una emisividad producto procedente de un NDVI (Ecuación 3.8), consecuentemente no es preferible utilizar el NDVI, ni el índice de cobertura vegetal para evaluar la relación entre TST y vegetación porque son variables dependientes entre sí. Por lo tanto para evaluar la cobertura de la vegetación es necesario aplicar otras técnicas de teledetección distintas al simple estudio del NDVI, en este sentido se ha utilizado el Análisis de Componentes Principales con la matriz de covarianza y la transformación "Tasseled Cap".

3.10.1 Análisis de Componentes Principales (ACP) como método de extracción de "verdor".

En el ACP multiespectral, la extracción de cargas factoriales a través de la matriz de covarianza puede ser interpretada subjetivamente como una variable biofísica. La primer componente, con altas carga factoriales en las bandas del visible (LANDSAT TM, Bandas 1,2,3) y en el infrarrojo medio (LANDSAT TM, Bandas 5,7) representa el "brillo" de la imagen (Horler et al.,1986; Conese et al., 1988); la segunda componente posee una alta carga factorial en el infrarrojo cercano (LANDSAT TM, Banda 4) y debido a la alta relación con la cantidad de vegetación se puede ser representar a esta componente como "verdor" (Fung et al., 1987); la tercer componente principal está influenciada negativamente por las bandas del visible (LANDSAT TM, Bandas 1,2,3) y positivamente por las bandas del infrarrojo medio (LANDSAT TM, Bandas 5,7), esto significa que mientras disminuye la reflectividad aumentan los niveles de humedad (Jensen et al., 1996), considerando que las cargas factoriales de las bandas del visible son negativas se puede interpretar la tercer componente como el inverso de la humedad. La cuarta, quinta y sexta componente contienen poca información y una muy baja cantidad de varianza explicada por lo que no tienen una interpretación clara.



Figura 3.47 Índice de vegetación mediante Análisis de Componentes Principales Multiespectral.

La evaluación de las cargas factoriales permite rectificar que el “brillo” está relacionado con la primer componente principal al tener altas cargas en todas sus banda, el hecho de tener todas las cargas negativas significa que se ha obtenido la inversa del brillo (Tabla 3.14).

La componente asociada al “verdor” está fuertemente cargada de manera negativa en la banda del infrarrojo cercano (Banda 4), esto significa que se ha obtenido el inverso del verdor y que posteriormente habrá que obtener el correspondiente valor positivo (Figura 3.47).

Por último, se aprecia que la componente asociada a la “humedad” correspondiente al tercer componente principal, está influenciada negativamente en las bandas del visible (Bandas 1,2 y 3) e infrarrojo cercano (Banda 4) y positivamente influenciada por las bandas del infrarrojo medio.

	<i>C.1</i>	<i>C.2</i>	<i>C.3</i>	<i>C.4</i>	<i>C.5</i>	<i>Co.6</i>
Desviación Estandar	14.87	7.17	3.91	1.42	0.94	0.48
Varianza	221.15	51.38	15.31	2.00	0.89	0.23
Varianza estandarizada	0.76	0.18	0.05	0.01	0.00	0.00
Varianza acumulada	0.76	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00
<i>Cargas factoriales</i>						
Banda.1	-0.28	0.12	-0.44	-	0.69	0.49
Banda.2	-0.37	-	-0.46	-	0.10	-0.79
Banda.3	-0.47	0.16	-0.34	-0.15	-0.69	0.37
Banda.4	-0.19	-0.95	-0.16	0.19	-	-
Banda.5	-0.51	-0.13	0.55	-0.62	0.18	-
Banda.7	-0.52	0.18	0.39	0.74	-	-

Tabla 3.14 Cargas factoriales ACP multiespectral a partir de la matriz de covarianza día juliano 179 (28 de junio 2011).

3.10.2 Transformación “Tasseled Cap” como método de extracción de “verdor”.

El ACP proporciona una reducción y un agrupamiento de datos multiespectrales, pero presenta diversos obstáculos con respecto a la interpretación física de las características derivadas y más aún cuando se trata con imágenes de distintos días (Crist et al., 1984). Para lograr una interpretación física de las imágenes satelitales Kauth-Thomas (1976) plantearon la necesidad de extraer características físicas de las imágenes satelitales LANDSAT MSS (Multi Spectral Scanner), en su trabajo, evaluaron distintos tipos de cubiertas de cultivos y suelos realizando medidas de espectrometría de campo obtenido un significado físico de cada una de las cubiertas. Posteriormente, utilizando sus medidas experimentales, propusieron utilizar una serie de coeficientes que describían inicialmente el brillo, verdor, y sequedad de las imágenes LANDSAT MSS, no obstante poco después definieron una nueva serie de coeficientes que describían el brillo, verdor y humedad (Kauth-Thomas 1979). Crist et al. (1986) calibraron los coeficientes propuestos por Kauth-Thomas (Tabla 3.15) para determinar el brillo, verdor (Figura 3.48), y humedad de las imágenes de energía radiante mediante LANDSAT TM. A su vez, Huang et al. (2002) determinaron los coeficientes para determinar brillo, verdor y humedad, para las imágenes LANDSAT ETM+ (Tabla 3.16).

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7	Additive term
B	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.1706	10.3695
G	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7220	0.0733	-0.1648	-0.7310
W	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	0.4186	-3.3828
4 th	0.8461	-0.0731	-0.4640	-0.0032	-0.0492	0.0119	0.7879
5 th	0.0549	-0.0232	0.0339	-0.1937	0.4162	-0.7823	-2.4750
6 th	0.1186	-0.8069	0.4094	0.0571	-0.0228	0.0220	-0.0336

3.15 Coeficientes Tasseled Cap para imágenes de energía radiante LANDSAT TM

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
B	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
G	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
W	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388
4 th	0.0805	-0.0498	0.1950	-0.1327	0.5752	-0.7775
5 th	-0.7252	-0.0202	0.6683	0.0631	-0.1494	-0.0274
6 th	0.4000	-0.8172	0.3832	0.0602	-0.1095	0.0985

3.16 Coeficientes Tasseled Cap para imágenes de reflectividad LANDSAT ETM+.



Figura 3.48 Índice de vegetación mediante Tasseled Cap.

3.10.3 Comparación del “verdor” entre Tasseled Cap y Análisis de Componentes Principales.

Tanto el ACP multiespectral como el “Tasseled Cap” proporcionan información relativa al brillo, verdor y humedad. Por una parte el ACP multiespectral genera las componentes de brillo, verdor y humedad al multiplicar los niveles digitales de reflectividad por la matriz de covarianza. Por otra, en el análisis Tasseled Cap las componentes de brillo, verdor y humedad son obtenidas al multiplicar los niveles digitales de energía radiante por la matriz de coeficientes propuesta por Crist et al., (1984). Por lo tanto resulta interesante determinar cuál de los índices de verdor describen mejor la vegetación urbana de Zaragoza.

Para llevar a cabo la comparación entre la segunda componente principal en un ACP multiespectral y el índice de verdor Tasseled Cap se ha optado por realizar un análisis de regresión lineal considerando el índice NDVI como referencia (Figura 3.49, Figura 3.50). Como el interés de obtener el verdor de las imágenes satelitales es conocer la vegetación en el entorno urbano para posteriormente comparar su beneficio en la reducción del efecto ICU. Se han extraído únicamente los valores digitales de verdor que existen en calles, andadores peatonales, parques y jardines, excluyendo otro tipo de superficies como las parcelas agrícolas y el suelo desnudo de la periferia urbana, cubiertas de edificios, y agua. Realizar este tipo de acotación explica de mejor manera la cantidad de vegetación en el entorno urbano y reduce la cantidad de datos asociados.

En la figura 3.49 se observa que la cantidad de verdor explicado por la segunda componente principal del ACP multiespectral, posee una dispersión elevada con respecto al NDVI, y por lo tanto un porcentaje de la varianza explicada (R^2) bastante bajo. Por otro lado, la transformación Tasseled Cap (Figura 3.50) explica de buena manera el verdor en el entorno urbano al tener una varianza explicada cercana a 1 ($R^2=0.958$) y una pendiente elevada en su línea de tendencia. Una elevada pendiente en la línea de tendencia significa que el índice de verdor es explicado en un amplio rango y por lo tanto existen mayores contrastes entre superficies con vegetación y superficies sin vegetación.

De la figura 3.51 a la figura 3.54 se muestra que el verdor es dependiente del ciclo fenológico de la vegetación, presentando valores bajos de verdor en invierno (20 de febrero, 2011) e incrementando el verdor conforme inicia el periodo de floración en primavera (9 de abril, 2011), una vez llegado el verano (28 de junio, 2011) la vegetación alcanza su máximo verdor y conforme avanza el otoño (7 de septiembre, 2011) empieza a notarse un decaimiento del verdor debido a la proceso de maduración de las cubiertas vegetales.

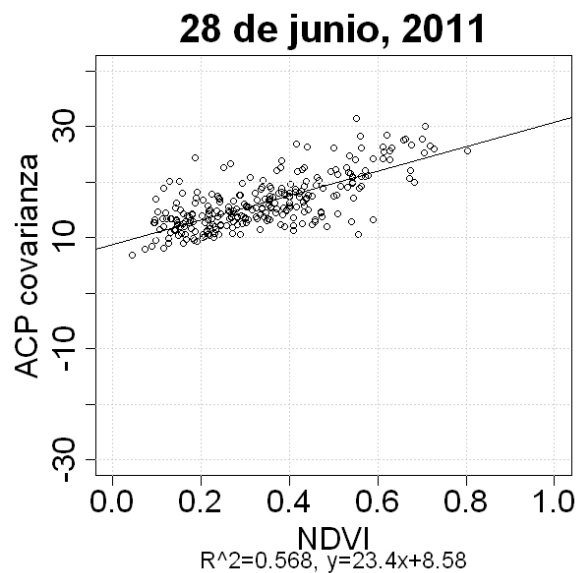


Figura 3.49 Regresión lineal ACP covarianza-NDVI, 28 de junio del 2011.

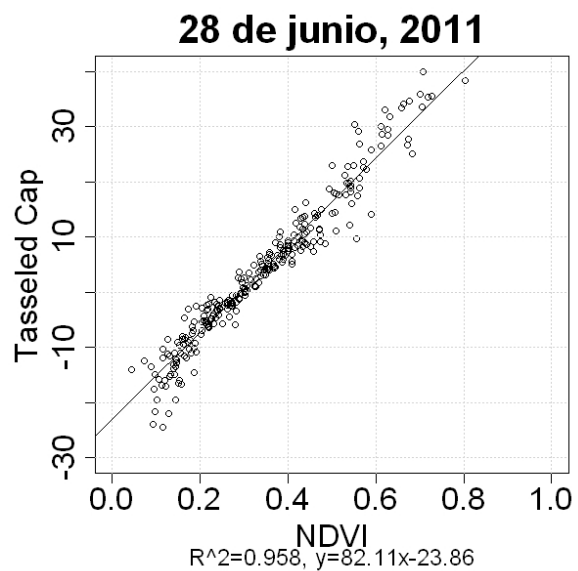


Figura 3.50 Regresión lineal Tasseled Cap-NDVI, 28 de junio del 2011.

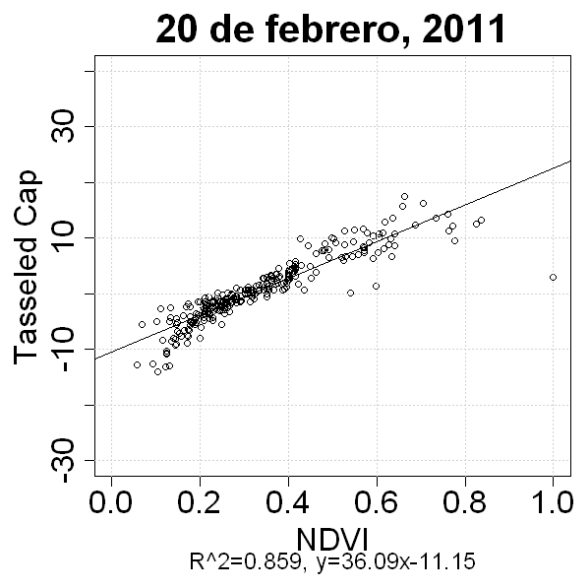


Figura 3.51 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 20 de febrero del 2011.

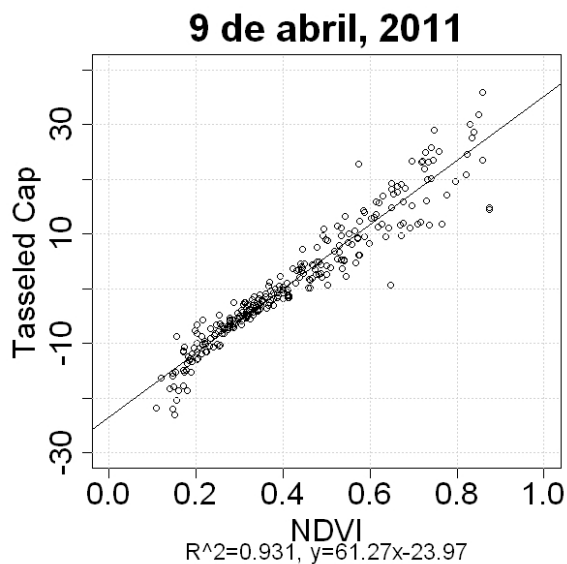


Figura 3.52 Análisis estacional del índice de verdor “Tasseled Cap” mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 9 de abril del 2011.

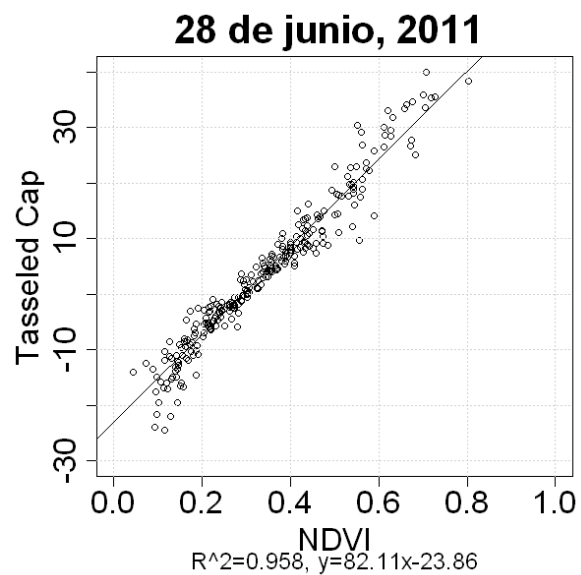


Figura 3.53 Análisis estacional del índice de verdor "Tasseled Cap" mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 28 de junio del 2011.

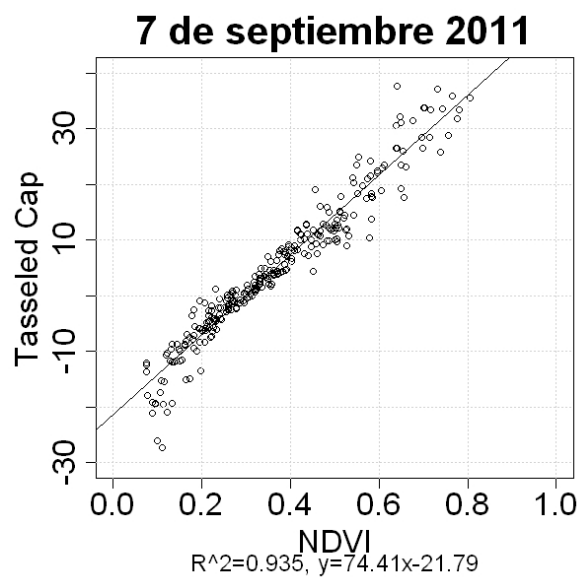


Figura 3.54 Análisis estacional del índice de verdor "Tasseled Cap" mediante un análisis de regresión lineal utilizando cubiertas urbanas, 7 de septiembre del 2011.

3.10.4 Perfil del “verdor” en el entorno urbano.

Una vez escogida la transformación Tasseled Cap para describir el verdor urbano de manera cuantitativa se está en condición de realizar una comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano. Para ello se han respetando los ocho ejes que se consideraron en el análisis TST y se han extraído los niveles digitales de verdor correspondientes al día 28 de junio del 2011. En las siguientes figuras se puede confirmar de manera cuantitativa el impacto de la vegetación en la TST; en el eje 1 se reconoce el barrio del ACTUR como uno de los barrios con mayor índice de verdor de la ciudad al presentar valores positivos Tasseled Cap, por otra parte se identifican barrios con escasa vegetación al presentar valores negativos Tasseled Cap como lo son los barrios Casco, Centro y Torrero (Figura 3.55); en el eje 2 se reconoce la influencia del Tasseled Cap en las parcelas agrícolas, y se reconoce el barrio de Casablanca como un barrio con fuertes contrastes con edificios destinados para uso industrial y edificios residenciales ajardinados (Figura 3.56); en el eje 3 se reconoce la vegetación sobre la ribera del río Ebro y se aprecia el beneficio de los parques y jardines como medida de mitigación del efecto ICU (Figura 3.57); siguiendo un análisis similar, los ejes cuatro a ocho demuestran que la vegetación es determinante la temperatura superficial urbana (Figura 3.58 a Figura 3.62).

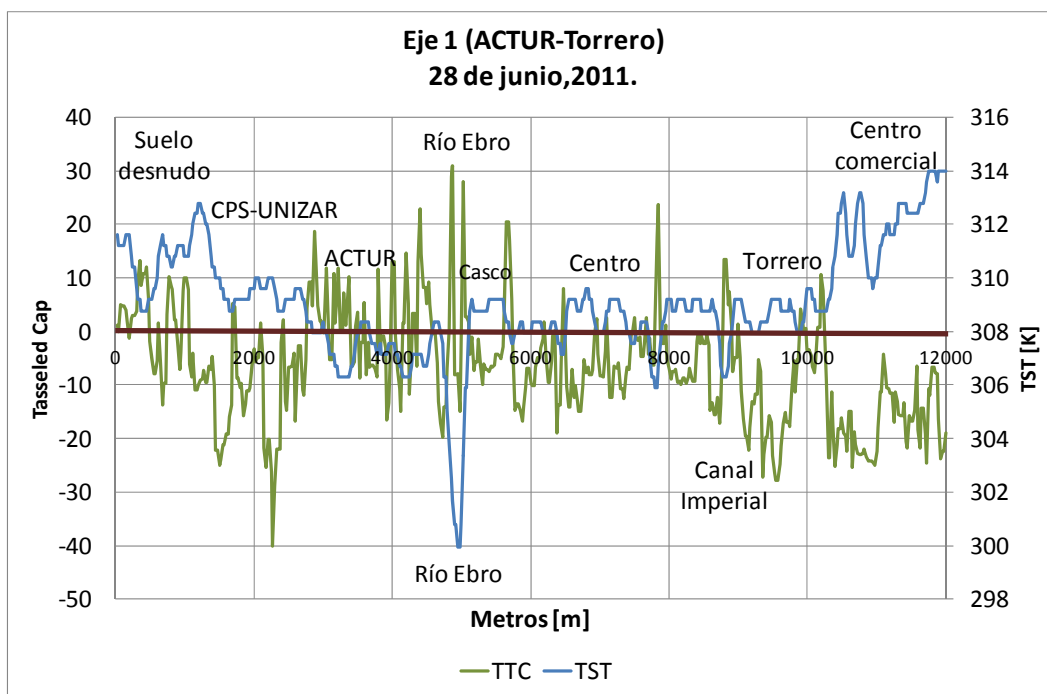


Figura 3.55 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 1.

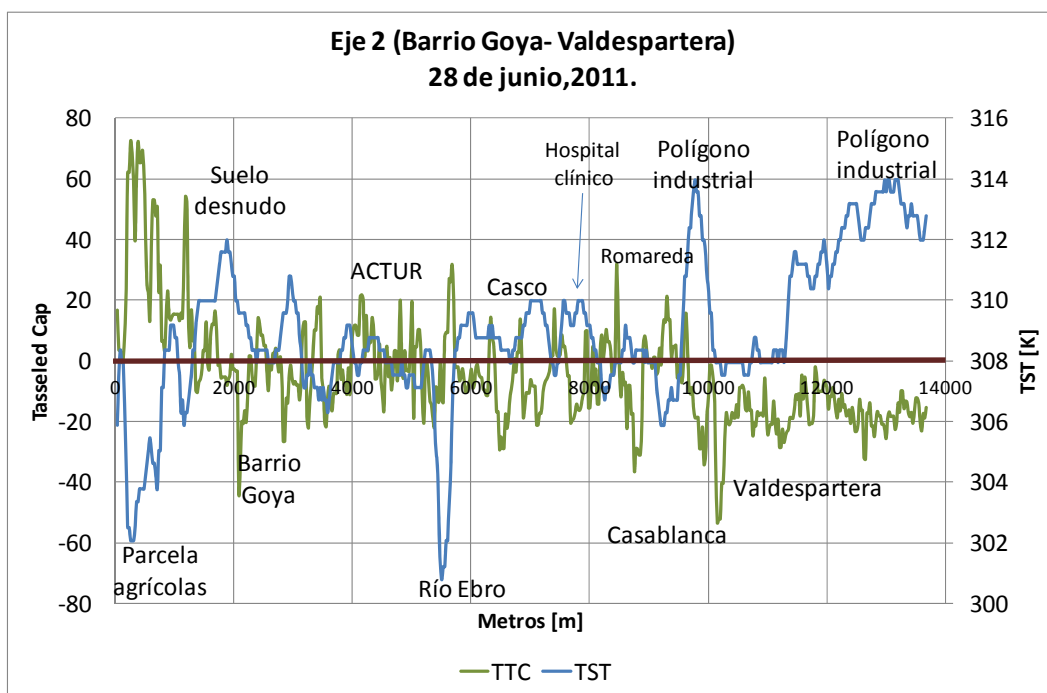


Figura 3.56 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 2.

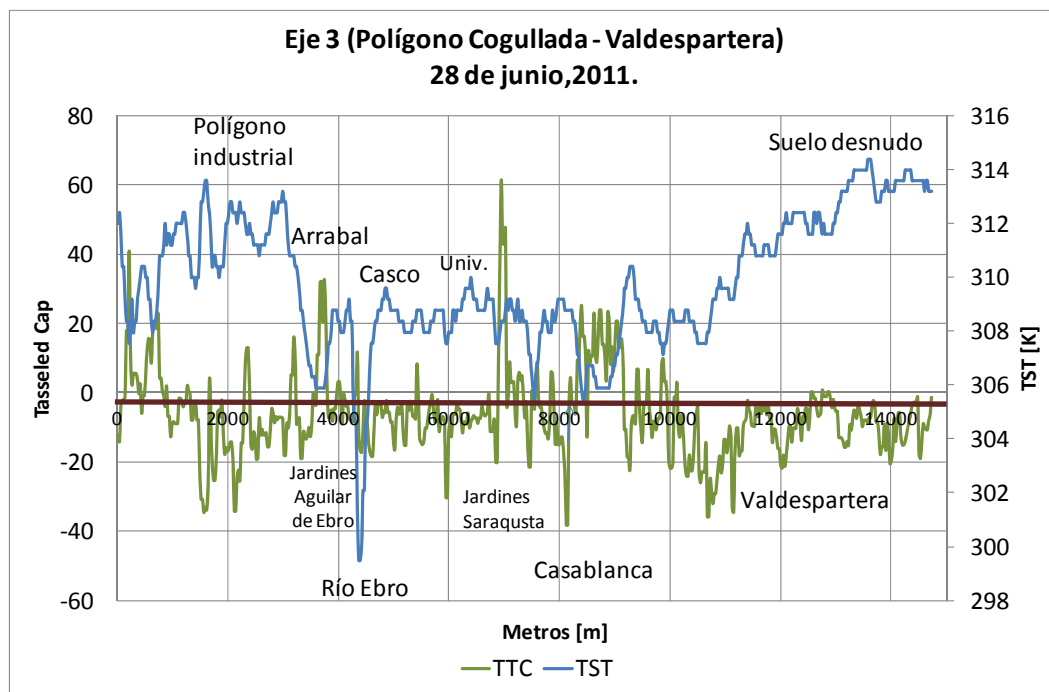


Figura 3.57 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 3.

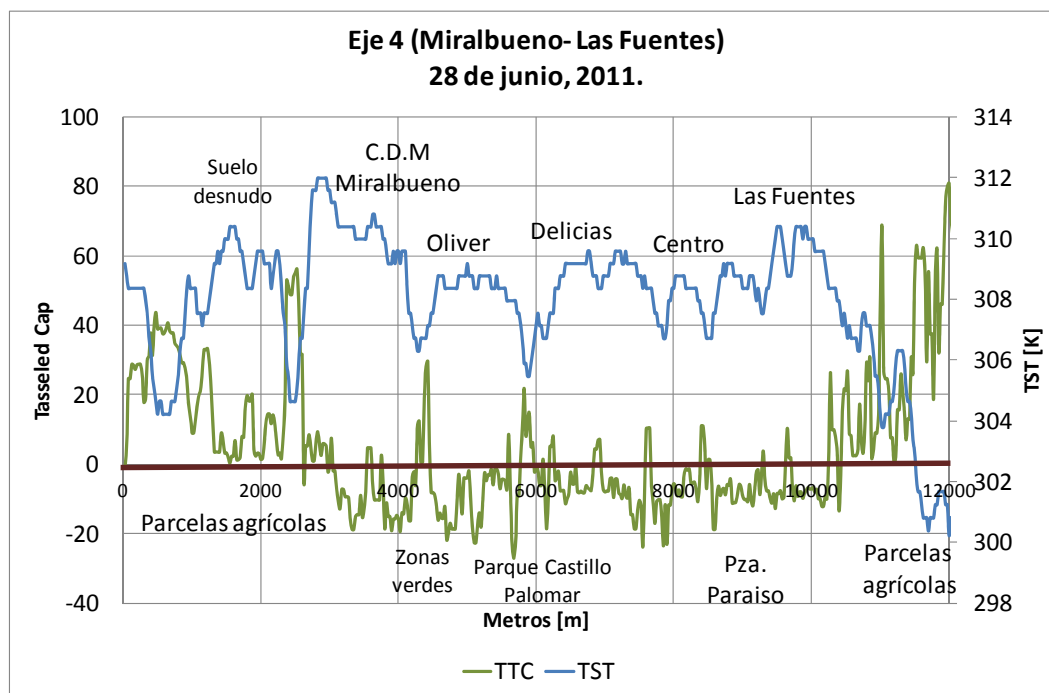


Figura 3.58 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 4.

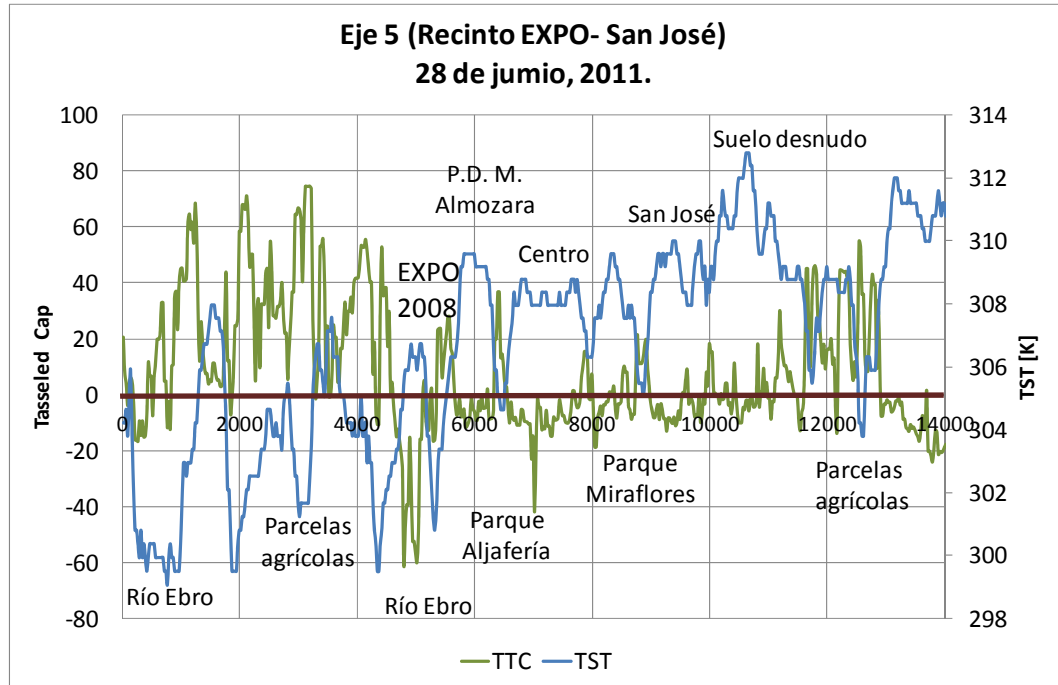


Figura 3.59 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 5.

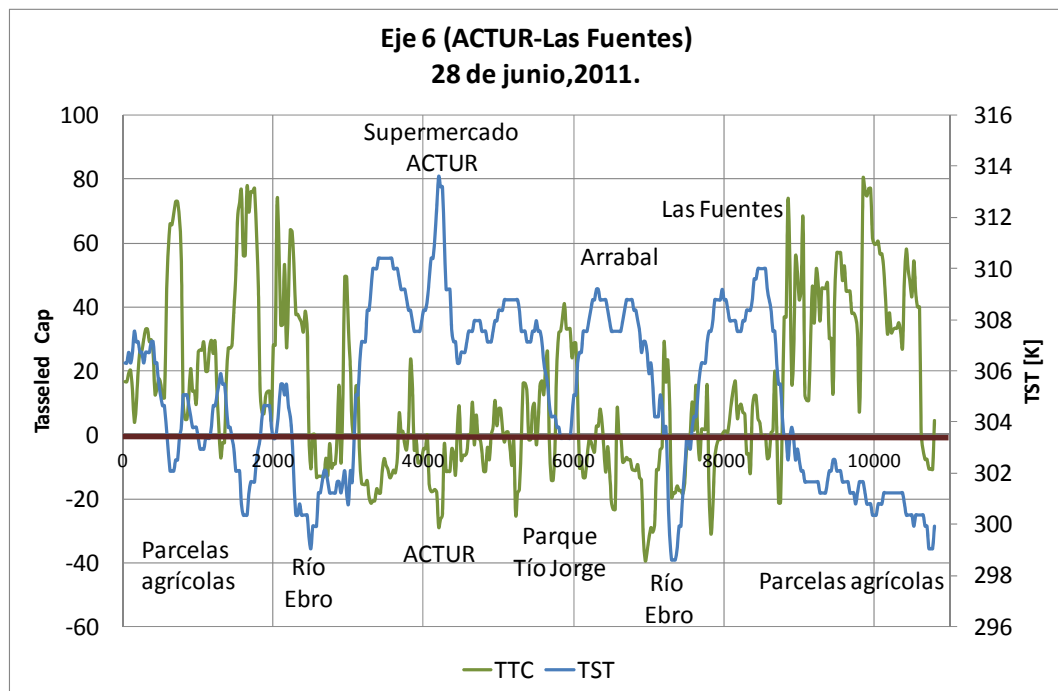


Figura 3.60 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 6.

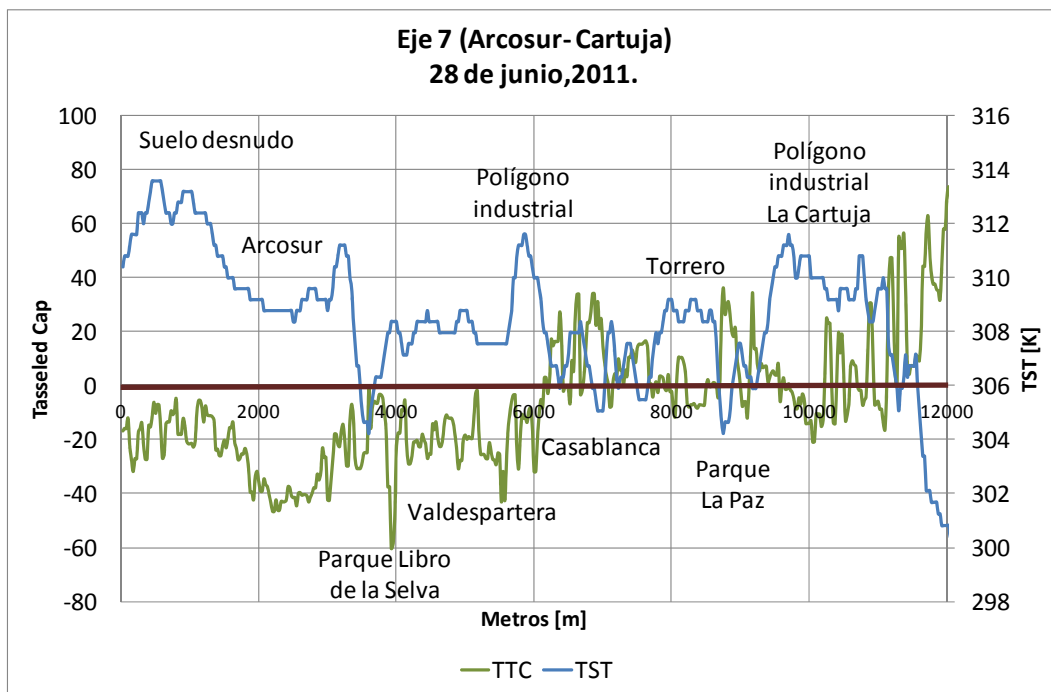


Figura 3.61 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 7.

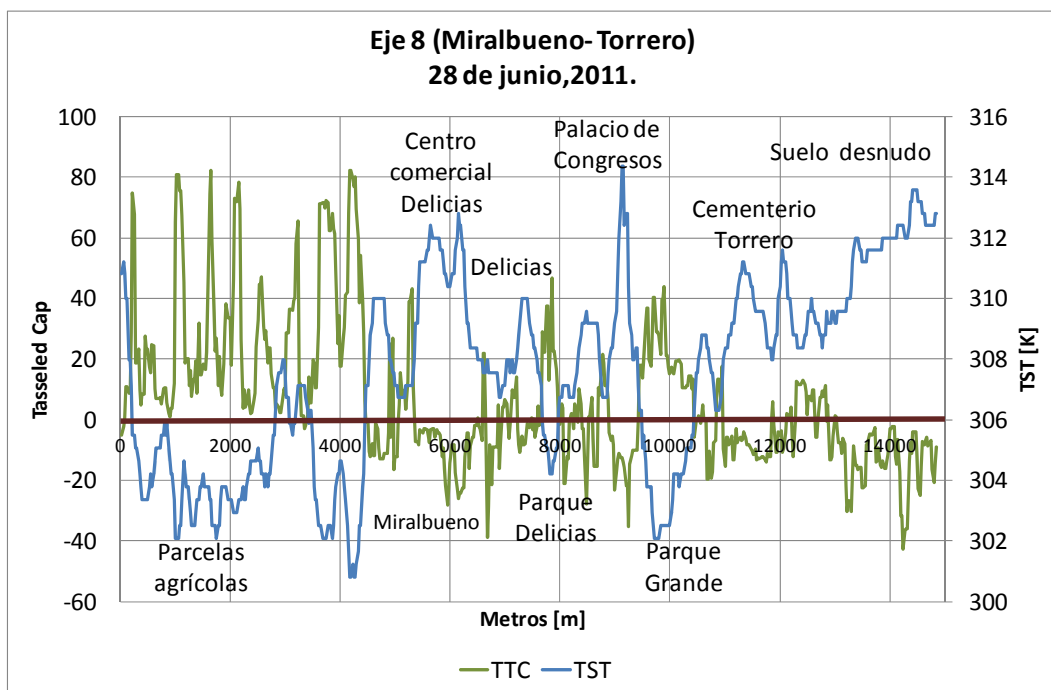


Figura 3.62 Comparación entre la TST y la cantidad de verdor urbano, eje 8.

3.11 Clasificación TST de acuerdo al uso de suelo.

La observación de la TST a través de transectos urbanos ha permitido observar distintos patrones de TST en función del tipo de uso de suelo de edificación. Razón por la cual es atractivo realizar un muestro aleatorio de puntos sobre el mapa de tipo de usos de suelo de la ciudad de Zaragoza (Figura 3.2). En la figura 3.63 se puede observar que las zonas industriales son las que presentan mayores temperaturas de TST y menor índice NDVI; los espacios destinados al sector terciario están caracterizados por tener una gran dispersión de TST y NDVI; el uso de suelo destinado al sector residencial presenta valores intermedios de TST alcanzando valores mínimos en zonas con vegetación urbana; y finalmente las zonas verdes presentan los valores mínimos de TST.

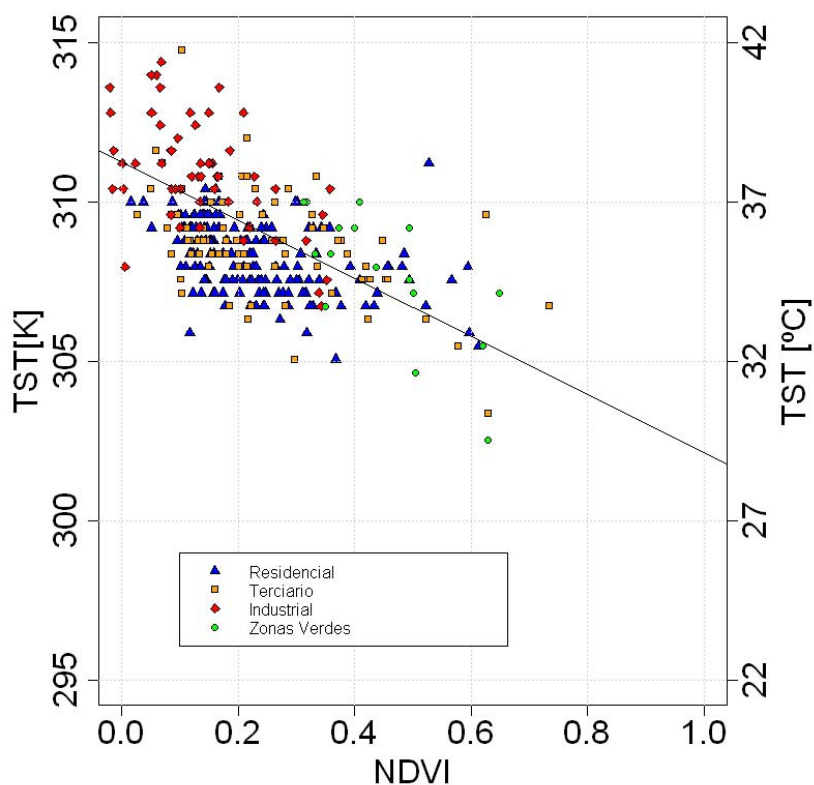


Figura 3.63 Observación de la TST de acuerdo al tipo de uso de suelo.

3.12 Método TVX para estimar la temperatura del aire.

La estimación de la temperatura del aire con imágenes satelitales está lejos de ser sencilla debido a que no son considerados los procesos convectivos de la atmósfera. Aunque falta investigación al respecto, el método Thermal Vegetation Index (TVX) es capaz de estimar la temperatura del aire con imágenes satelitales, en la mayoría de los casos este método utiliza imágenes de baja resolución (1 Kilómetro/píxel), sin embargo para esta tesis se ha adaptado el método para las imágenes satelitales de 30 metros/píxel. Esta metodología incluye dos pasos: i) la derivación de TST de señal térmica infrarroja recibida por el sensor, y (ii) la estimación de la temperatura del aire mediante la TST (Vancutsem et al., 2010).

El método TVX se basa en considerar la temperatura superficial de las cubiertas vegetales en equilibrio con la temperatura ambiente debido a la similar capacidad calorífica de la vegetación y el aire circundante (Nemani et al., 1989, Goward et al., 1985, Goetz et al., 1997). En este sentido la temperatura del aire se establece realizando una regresión lineal entre el índice de vegetación (generalmente el NDVI) y la TST, estableciendo un valor máximo de cobertura vegetal (NDVImax) donde la temperatura del aire será igual a la TST (Nieto et al., 2011). Diversos valores NDVImax han sido encontrados en la bibliografía para determinar la temperatura ambiente mediante el método TVX, entre otros autores Boegh et al. (1999) han utilizado el valor de NDVImax=0.77 para el uso de imágenes LANDSAT TM.

Es importante considerar que en las imágenes satelitales diurnas (LANDSAT TM, LANDSAT ETM+), hay una gran diferencia entre la TST y la temperatura del aire causada por un complejo balance superficial de energía que depende de muchas variables como la radiación solar, el contenido de humedad del terreno y la posible aparición de nubes en la imagen satelital (Prince et al., 1998). Por el contrario en imágenes satelitales nocturnas (MODIS AQUA, MODIS TERRA) la estimación de la temperatura es más sencilla debido a que la radiación solar no afecta a la señal del infrarrojo térmico.

En esta tesis se ha aplicado el método TVX para cada una de las imágenes TST de la ciudad de Zaragoza con su correspondiente NDVImax. Es importante recordar que el NDVI varía respecto al ciclo fenológico de la vegetación y por lo tanto es distinto de acuerdo a la estación del año, por otra parte, dentro de las imágenes NDVI existen tanto cubiertas vegetales correspondientes a parcelas agrícolas con riego permanente como a cubiertas vegetales correspondientes a la vegetación urbana. En este sentido se ha extraído el valor NDVImax correspondiente a la vegetación dentro del entorno urbano.

En la tabla 3.17 se presentan las ecuaciones que estiman la temperatura del aire de acuerdo al método TVX, para cuatro imágenes TST representativas de las cuatro estaciones del año. Seguidamente, de la figura 3.64 a la figura 3.67 se muestran las correspondientes regresiones lineales de la TST con respecto al NDVI.

La estimación de la temperatura por el método TVX se realiza exclusivamente al momento que ha sido adquirida la imagen satelital, por ello, para realizar la validación de dicha temperatura es necesario compararla con datos experimentales. De la figura 3.68 a la figura 3.71 se muestra una comparación entre la temperatura del aire medida por las distintas sondas meteorológicas y la temperatura estimada por el método TVX.

La temperatura del aire estimada a las diez y media de la mañana, hora de la adquisición de las imágenes, es superior a la registrada experimentalmente en prácticamente todas las sondas meteorológicas. Los principales motivos de esta sobrestimación de temperatura es que el método TVX es limitado y no es capaz de estimar el efecto de la reducción de temperatura por la velocidad del viento ni por las posibles sombras que reciben los sensores de las estaciones meteorológicas. Por el contrario, las sondas meteorológicas instaladas en Valdespartera muestran una mejor estimación de la temperatura del aire debido a que se encuentran protegidas al viento y no reciben sombra por elementos urbanos.

<i>Adquisición de la imagen</i>	<i>Taire</i>	<i>NDVImax</i>
2011-02-20	$T_{aire} = -1.3 * NDVImax + 285.7$	0.8
2011-04-09	$T_{aire} = -3.9 * NDVImax + 304.3$	1
2011-06-28	$T_{aire} = -6.2 * NDVImax + 309.9$	0.85
2011-09-07	$T_{aire} = -4.4 * NDVImax + 305.8$	0.77

3.17 Temperatura del aire estimada mediante método TVX.

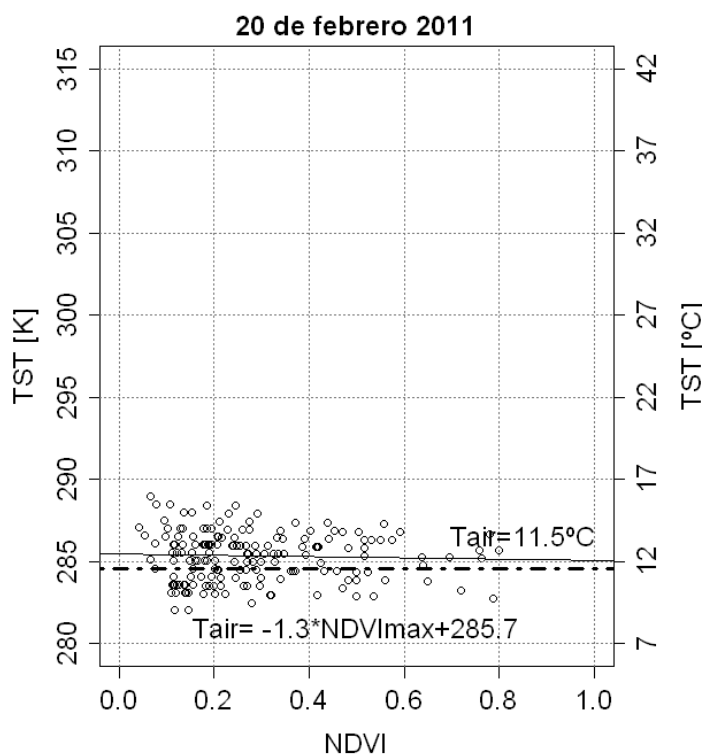


Figura 3.64 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 20 de febrero del 2011.

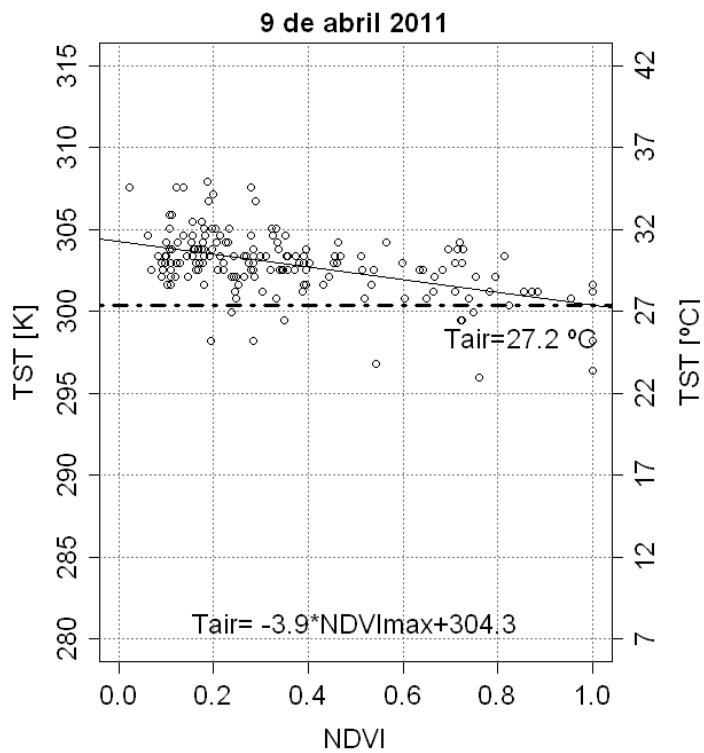


Figura 3.65 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 9 de abril del 2011.

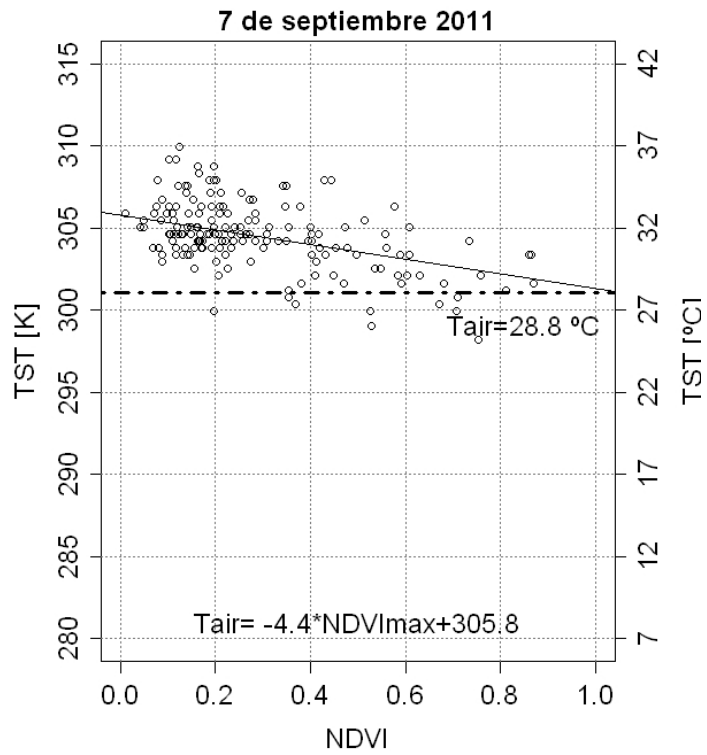


Figura 3.66 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 7 de septiembre del 2011.

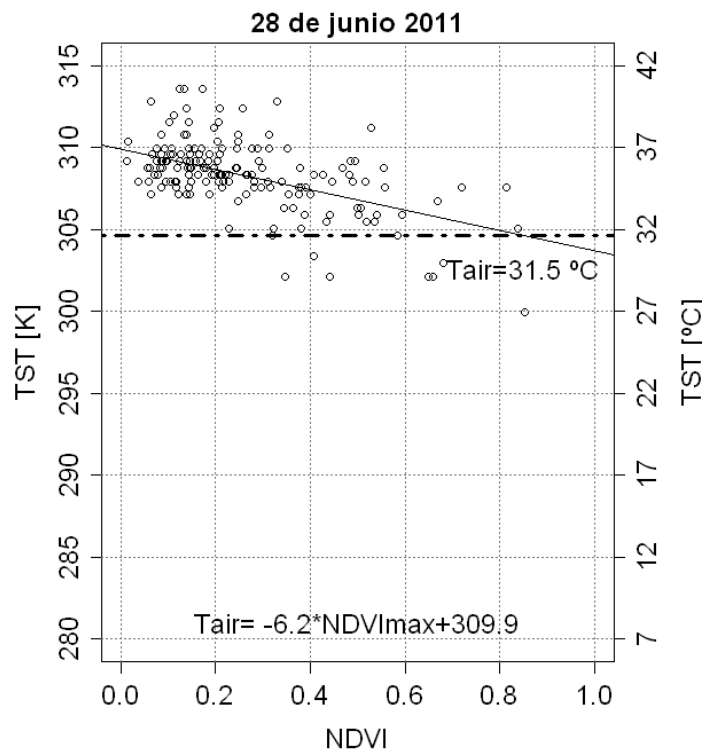


Figura 3.67 Estimación de la temperatura del aire mediante método TVX, 28 de junio del 2011.

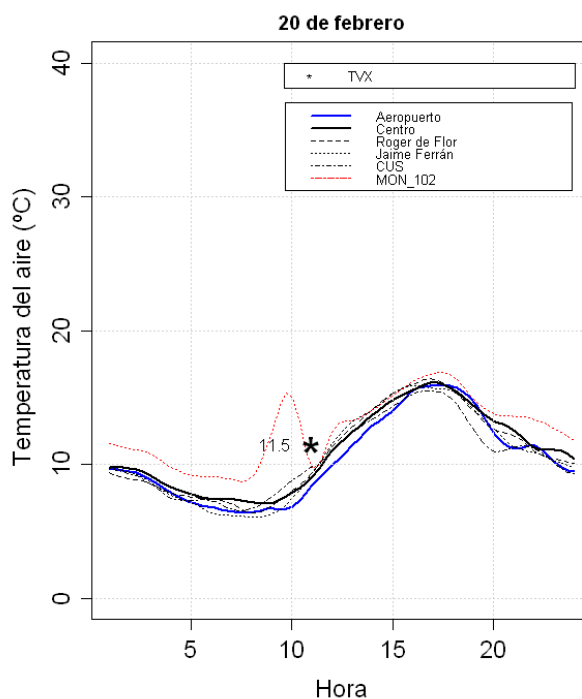


Figura 3.68 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 20 de febrero del 2011.

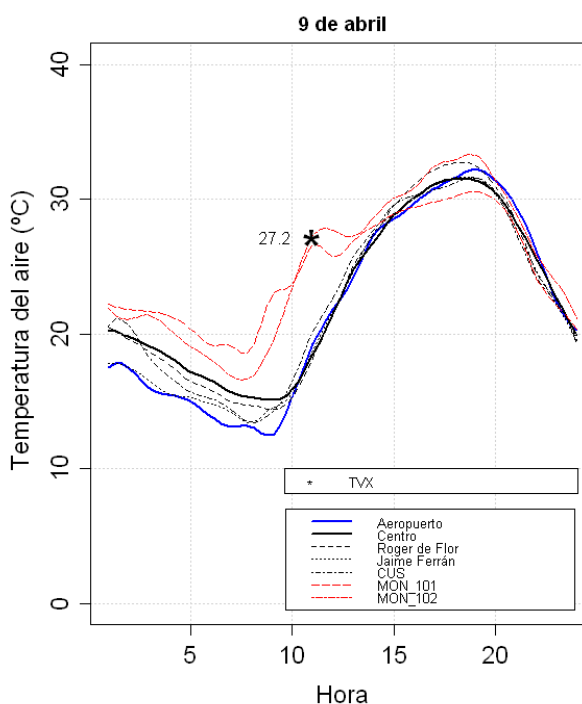


Figura 3.69 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 9 de abril del 2011.

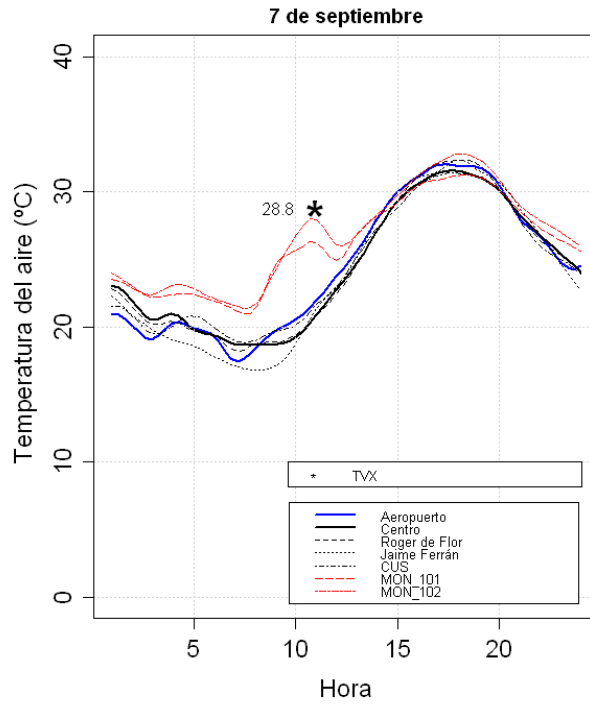


Figura 3.70 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 7 de septiembre del 2011.

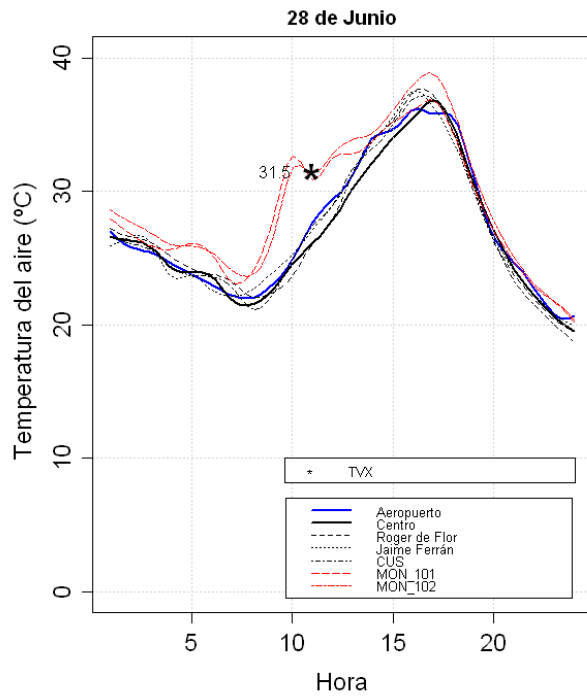


Figura 3.71 Comparación entre temperatura del aire estimada con sondas meteorológicas, 28 de junio del 2011

3.13 Medidas de la forma y espacio urbano, variables extraídas mediante SIG.

Los espacios urbanos donde se llevan a cabo las actividades humanas se llevan a cabo en dos tipos de espacios construidos: en edificios y por el sistema de espacios que permite la comunicación entre estos (Escolano et al., 2011). Razón por la cual es de especial interés realizar un estudio de la forma y espacio urbano para analizar de manera integral las relaciones espaciales de la ciudad y su dependencia con el efecto ICU.

El análisis espacial del entorno urbano implica seleccionar una serie de parámetros de estructura y forma urbana. De acuerdo con Escolano et al. (2011), existen dos formas de estudiar la morfología urbana. Un primer grupo de parámetros, analiza la ciudad de manera global, se refieren al alcance y resolución del área de estudio, y caracterizan la forma urbana en su conjunto. Este tipo de parámetros sirven para describir fenómenos de crecimiento urbano y otros fenómenos temporales. Por otra parte, Escolano et al. (2011) mencionan que existe otro grupo de parámetros locales que se aplican a una escala interurbana, y que su carácter eminentemente geométrico permite relacionar las relaciones de las estructuras internas con su entorno más cercano.

Ahora bien, hablar de serie de parámetros urbanos que serán asociados al estudio ICU, implica realizar un proceso de transformación de información vectorial obtenida mediante SIG a información almacenada en formato raster compatible con las variables obtenidas mediante técnicas de teledetección satelital.

3.13.1 Distancia al centro urbano.

El centro urbano es el punto neurálgico de las principales actividades socioeconómicas y recreativas de una ciudad, por él, atraviesan un gran número de personas y vehículos, y generalmente se encuentran los edificios más antiguos de la ciudad. La elección del centro urbano se ha realizado en función a estos conceptos, estableciendo a la Plaza España como el punto neurálgico de la ciudad de Zaragoza (Figura 3.72).

3.13.2 Altitud.

Las condiciones climáticas de una región están fuertemente influenciadas por la altitud, reconociendo incluso a nivel urbano una fuerte variabilidad de temperatura entre las distintas zonas altas y las zonas bajas. Por ello se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones para obtener los niveles digitales asociados a la altura de Zaragoza, reconociendo como las zonas de menor altitud los cauces de los ríos Ebro y Gállego; por otra parte se identifican los barrios de San José, Torrero, Montecanal y Valdespartera como las partes más altas de la ciudad (Figura 3.73).

3.13.3 Pendiente topográfica.

El fenómeno de los vientos se encuentra con frecuencia en los valles largos y estrechos de las zonas montañosas, como lo es la depresión del valle del Ebro. En este sentido las variaciones locales de la topografía influyen en gran medida las condiciones del viento, moviendo el aire frío desde las partes altas de la montaña hacia las partes bajas del valle.

3.13.4 Distancia a ríos Ebro y Gállego.

Los ríos Ebro y Gállego juegan un papel fundamental como regulador del clima urbano proveyendo permanente humedad y facilitando el flujo del aire. Razón por la cual se ha considerado que debe considerarse la influencia de las masas de agua en el fenómeno de la ICU. Para ello a partir de la clasificación CORINE LAND COVER se han extraído las masas de agua que atraviesan la ciudad de Zaragoza y posteriormente se ha realizado una transformación a cobertura raster de las distancias de los ríos. Cabe la pena señalar que para este estudio se ha descartado el río Huerva y el Canal Imperial debido a que su ancho está por debajo de la resolución mínima de la cobertura raster, además el impacto del agua de estas dos masas de agua es menor con relación al impacto de la vegetación de sus riberas (Figura 3.74).

3.13.5 Perímetro urbano.

El perímetro urbano limita el área de estudio del efecto ICU y relaciona la influencia de factores climáticos externos sobre la ciudad. Con este parámetro urbano se logra identificar la clara relación entre los edificios con uso de suelo industrial y su cercanía con las zonas periféricas a la ciudad. Vale la pena mencionar que si se desea realizar un estudio de crecimiento urbano a lo largo del tiempo, el perímetro debe ser modificado de acuerdo al crecimiento de las manzanas de la periferia (Figura 3.75).

3.13.6 Compacidad urbana.

Un parámetro inherente al entorno urbano es la medida de compacidad de la edificación, que cuantifica el número de edificios sobre una superficie determinada. En Zaragoza, los barrios cercanos al centro muestran un trazado desorganizado con una alta compacidad entre edificios, mientras que los barrios más recientes situados en la periferia demuestran tener estudios previos de urbanismo y se caracterizan por tener una baja compacidad. La relación del efecto de la ICU con la compacidad radica en que las zonas de la ciudad densamente edificadas, al tener mayor superficie de fachadas irradiarían, una mayor cantidad de calor.

El proceso para obtener información de la compacidad urbana y su posterior almacenamiento en una capa tipo raster, inicia calculando los centroides de las manzanas previamente digitalizadas por la Dirección General del Catastro. Esto es así para poder calcular el promedio de distancias entre los pares de centroides de manzanas (Escolano et al.,2011), mientras más cerca entre sí se encuentren los centroides mayor será la compacidad urbana (Figura 3.76).

Para lograr transformar la información de compacidad urbana en una capa raster se propone generar polígonos de Thiessen a partir de los centroides que describen cada manzana. Los polígonos de Thiessen se crean al unir puntos (centroides) mediante mediatrices en su segmento de la unión. Las intersecciones de estas mediatrices generan polígonos equidistantes a los puntos vecinos delimitando el área de influencia de cada punto. El interés de generar este tipo de polígonos estriba en que este tipo de estructura geométrica considera tanto a la manzana como a su entorno más cercano, es decir la separación debida a calles ó a otros edificios (Figura 3.77).

Una vez generados los polígonos de Thiessen, es posible estimar el área que hay dentro de cada polígono, siendo las áreas pequeñas las que demuestran tener una mayor compacidad urbana. Por el contrario los polígonos de Thiessen con mayor área demuestran tener una menor compacidad urbana debido a que los centroides con los que fueron generados se encuentran a mayor distancia entre sí (Figura 3.78).

Ahora bien, la relación entre el área del polígono de Thiessen y la compacidad es inversamente proporcional por lo que puede ser confuso entender esta información en una cartografía, por lo que se ha optado por calcular el valor inverso del área con el fin que sean proporcional con la compacidad urbana.

El último paso para obtener la información de compacidad urbana de forma cuantitativa es convertir la información superficial almacenada en un campo de la estructura vectorial a una capa tipo raster normalizada. Asignando el valor de 1 a la mayor compacidad urbana (menor área) y el valor de 0 a la menor compacidad urbana (mayor área). (Figura 3.79)

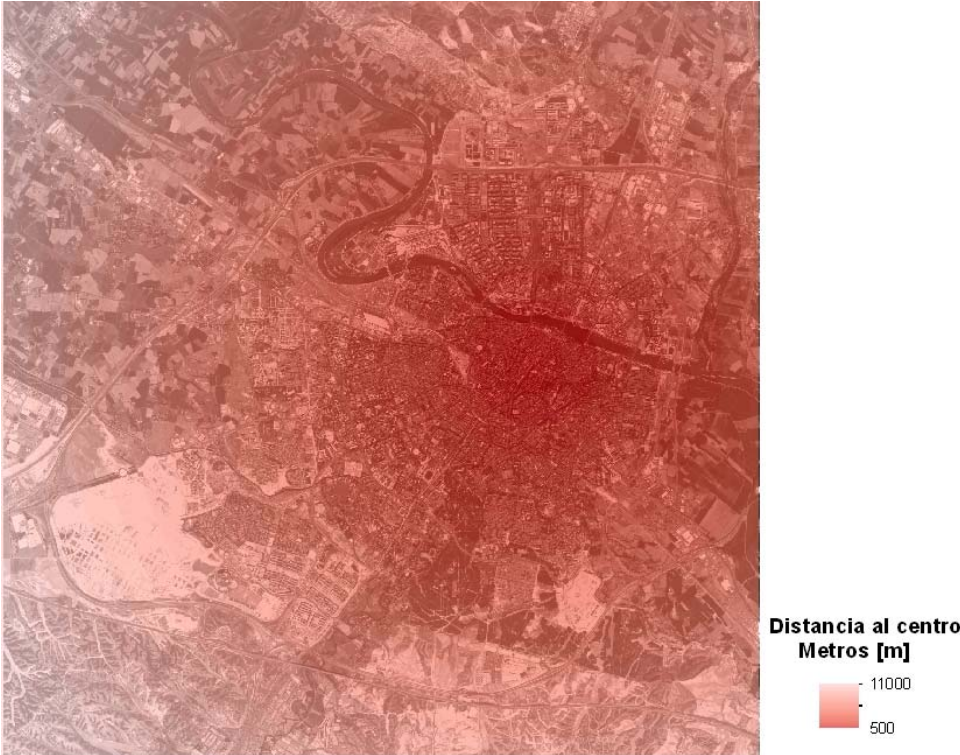


Figura 3.72 Distancia en metros de la Plaza España hacia la periferia.

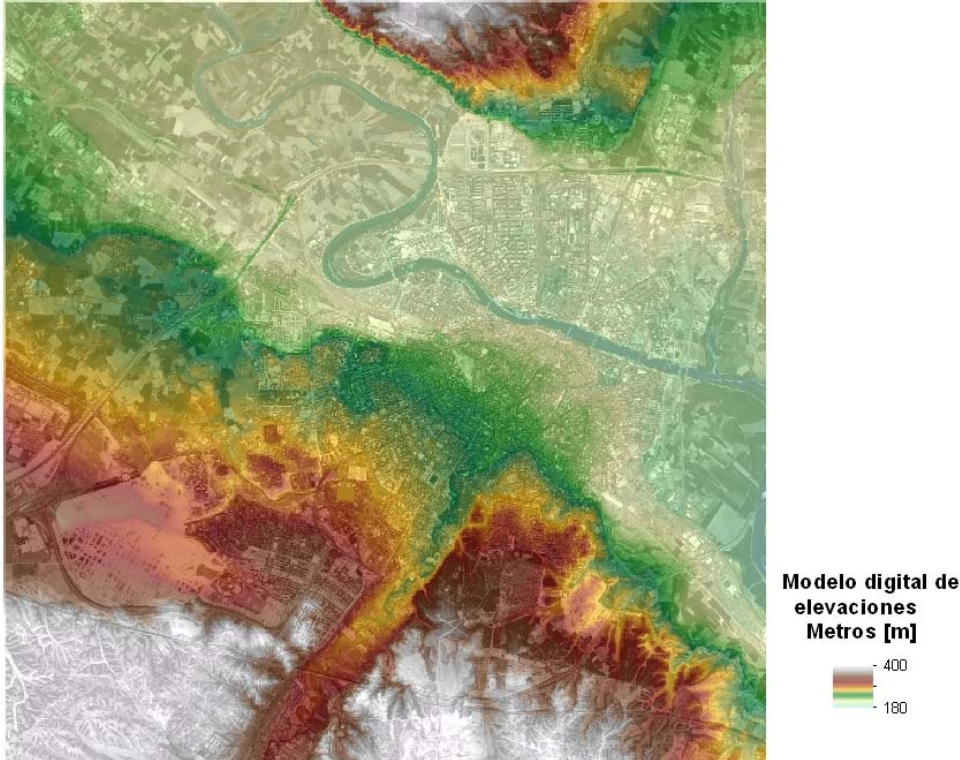


Figura 3.73 Modelo digital de elevaciones.

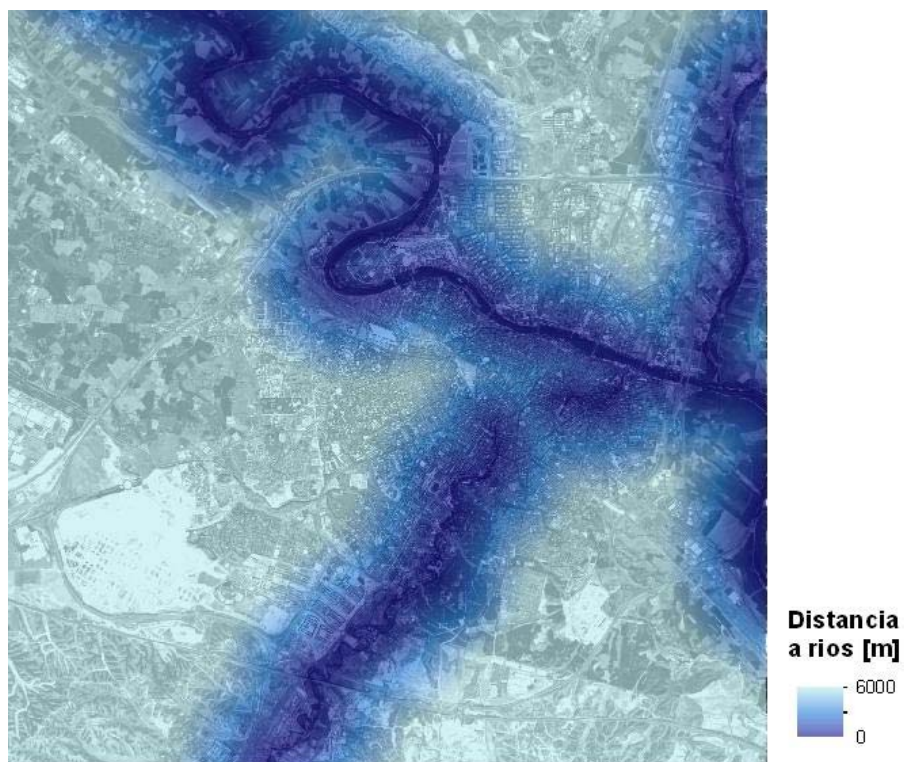


Figura 3.74 Influencia de los ríos Ebro y Gállego al entorno urbano.

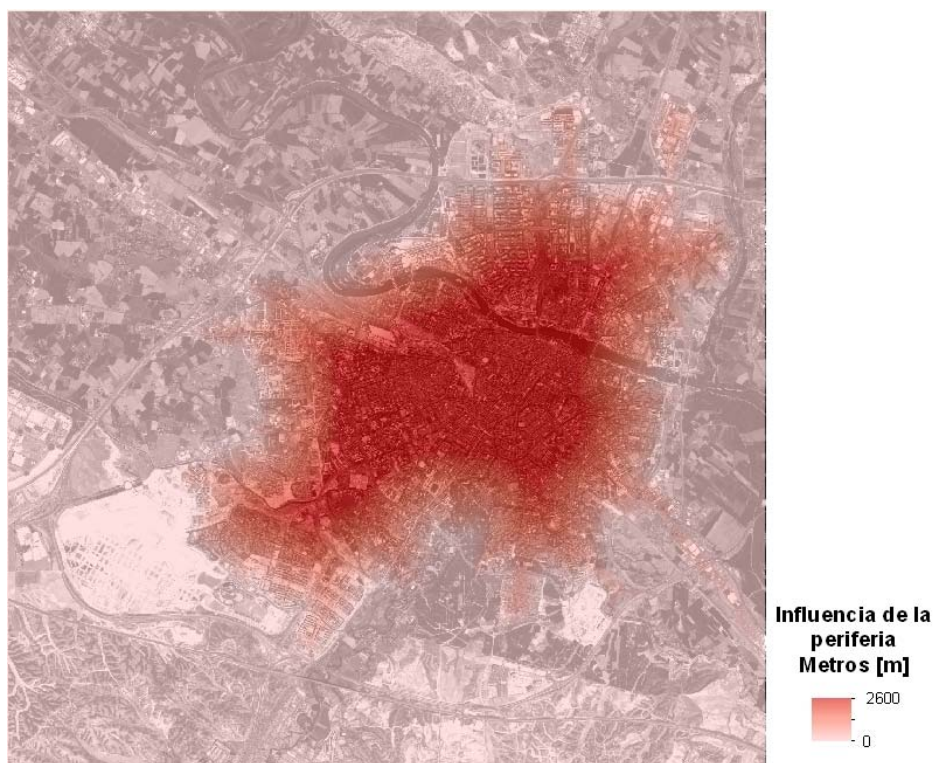


Figura 3.75 Influencia del perímetro al entorno urbano.



Figura 3.76 Detalle de generación de puntos sobre parcelas.

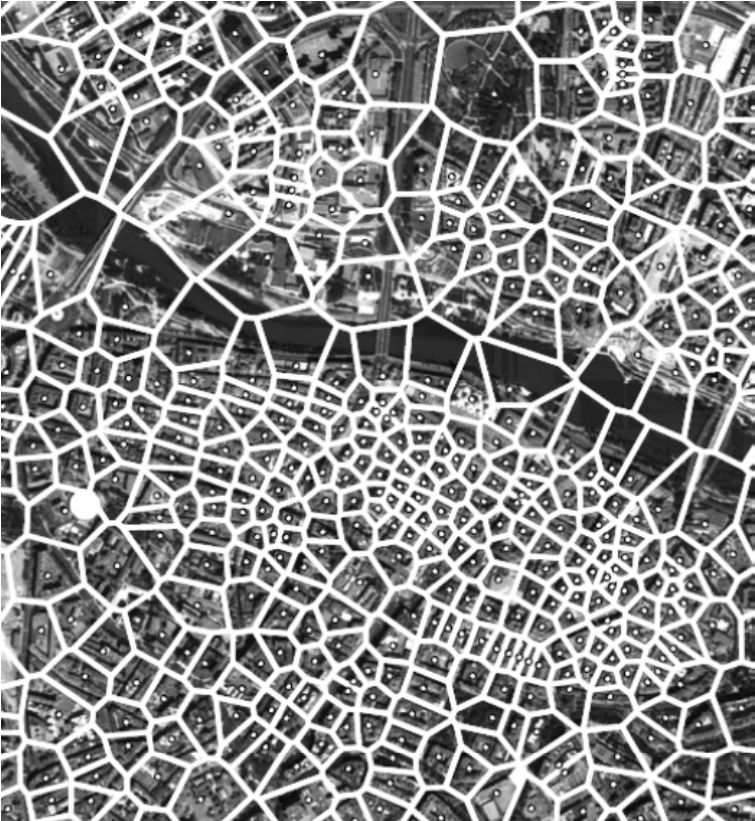


Figura 3.77 Detalle de generación de polígonos de Thiessen.

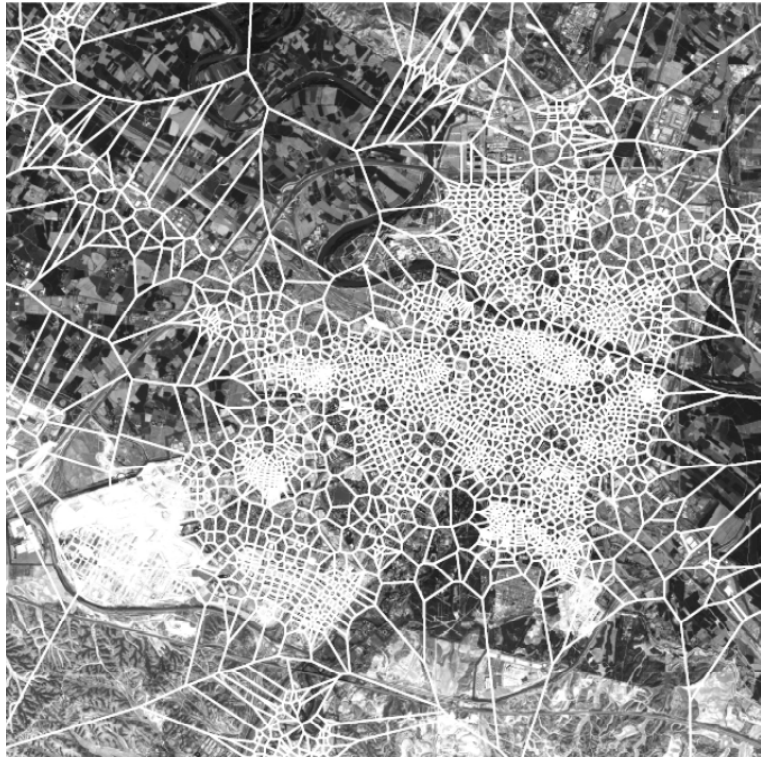


Figura 3.78 Polígonos de Thiessen aplicados al entorno urbano.

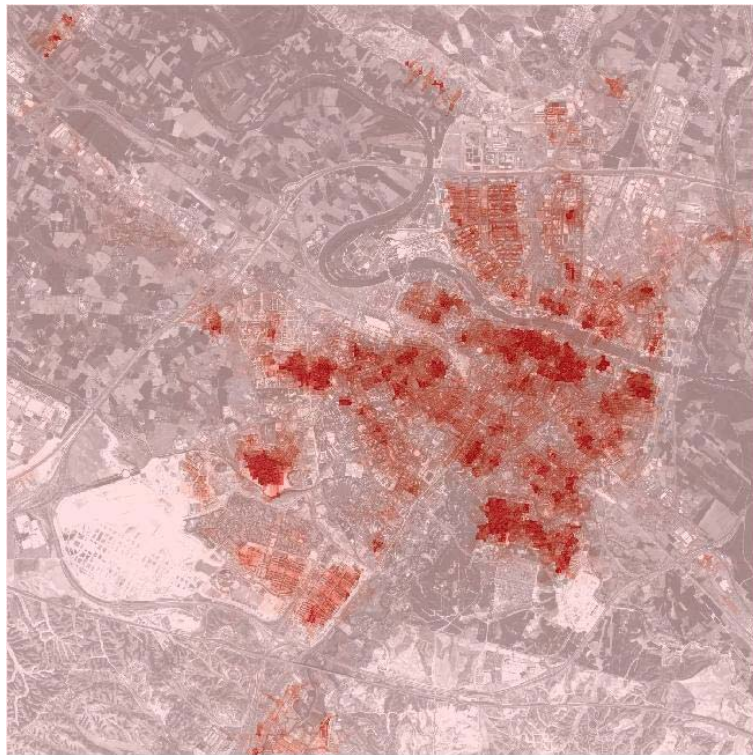


Figura 3.79 Influencia de la compactidad al entorno urbano.

CAPÍTULO 4. MAPA ANALÍTICO DEL CLIMA URBANO ZARAGOZA, ESPAÑA.

Abstract.

This chapter makes the most of the variables determining urban climate for formulating an adequate methodology of Urban Climate Analytical Map modeling. The series of steps to carry out modeling starts by eliminating redundant information with a Clustering Analysis and later by evaluating the factorial weights of the variables involved in UHI effect by means of an Analytic Hierarchy Process. The verification of the Urban Climate Analytical Map with experimental measures will allow a process of model calibration and optimization. In the last part of this chapter, one methodology for obtaining the zones with the greatest potential of change in urban climate is carried out using Geographical Information Systems in order to make decisions.

La metodología para elaborar un Mapa Analítico del Clima Urbano requiere un estudio espacial del entorno para generar como resultado una serie de categorías que definen los distintos climas urbanos. Para ello, a lo largo de esta tesis se han utilizado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar una serie de capas de información que explican los factores climáticos y consideraciones de planificación para la ciudad de Zaragoza.

Definir un Mapa Analítico del Clima Urbano no es sencillo, en primer lugar porque cuando se dispone de una gran cantidad de capas de información es muy probable tener información redundante. En segundo lugar y como es evidente, las ciudades son diferentes tanto en clima como en problemáticas urbanas y por lo tanto las capas de información que describen su respectivo clima urbano serán siempre diferentes. En la generación del Mapa Analítico del Clima Urbano para la Zaragoza se ha considerado necesario aplicar métodos estadísticos, tanto para extraer la información más significativa de las diversas capas de información, como para el análisis jerárquico de las variables más significativas del efecto ICU (Figura 4.1).

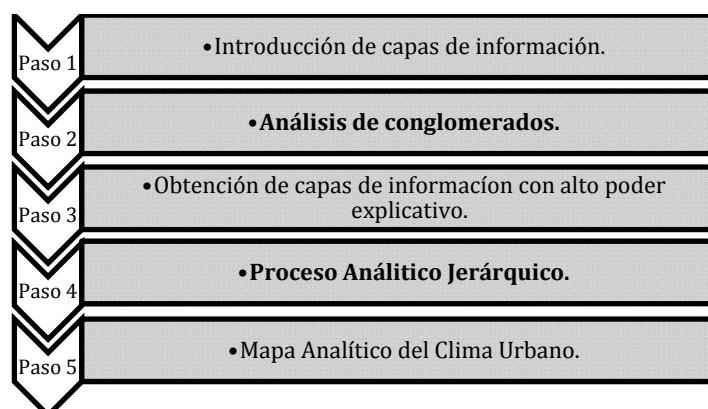


Figura 4.1 Proceso metodológico propuesto para la elaboración de Mapas Analíticos del Clima Urbano.

4.2 Análisis de Conglomerados.

El análisis de conglomerados es una técnica de análisis exploratorio de datos para resolver problemas de clasificación cuando existe una gran cantidad de información y ésta es compleja de analizar en su conjunto. Su principal objetivo consiste en ordenar en grupos o conglomerados, de forma que el grado de asociación entre miembros del mismo conglomerado sea más fuerte que el grado de asociación entre miembros de diferentes conglomerados.

Para el estudio de la ICU de Zaragoza, se ha generado una gran cantidad de información que explica los factores climáticos y la morfología de la ciudad, por lo que resulta atractivo aplicar un análisis de conglomerados para descubrir asociaciones y estructuras de datos similares que no son evidentes a priori pero que pueden ser útiles una vez que se han encontrado. En otras palabras, es posible que dos o más variables expliquen de manera muy similar un comportamiento térmico por lo que se puede simplificar el análisis seleccionando una variable.

El análisis de conglomerados determina en primera instancia la distancia entre variables y posteriormente determina sucesivamente la distancia entre conglomerados. Para el estudio ICU, la distancia entre variables ha de calcularse con la matriz de disimilaridad (también conocida como matriz de distancias) producto de su correspondiente matriz de correlación. Recordando que la matriz de correlación es el conjunto de todas las capas de información con datos estandarizados.

En concreto se ha utilizado del método de Ward (Ward, 1963) para determinar la distancia entre conglomerados, también conocida como método de varianza mínima. Es importante mencionar que existen diversas formas de medir la distancia entre conglomerados y con cada método se producen diferentes agrupaciones. No hay un criterio para seleccionar cual de los algoritmos es el mejor. La decisión es normalmente subjetiva y depende del método que mejor refleje los propósitos de cada estudio particular, en el caso del análisis ICU el método de Ward reflejo el mejor agrupamiento de las distintas variables de información.

En la figura 4.2 se muestra el dendrograma¹² correspondiente al análisis por conglomerados realizado con las distintas capas de información generadas a lo largo de esta tesis. Los objetos similares se conectan mediante enlaces cuya posición en el diagrama está determinada por el nivel de similitud o disimilitud entre los objetos.

¹² Dendrograma: Un dendrograma es una representación gráfica en forma de árbol que resume el proceso de agrupación en un análisis de conglomerados.

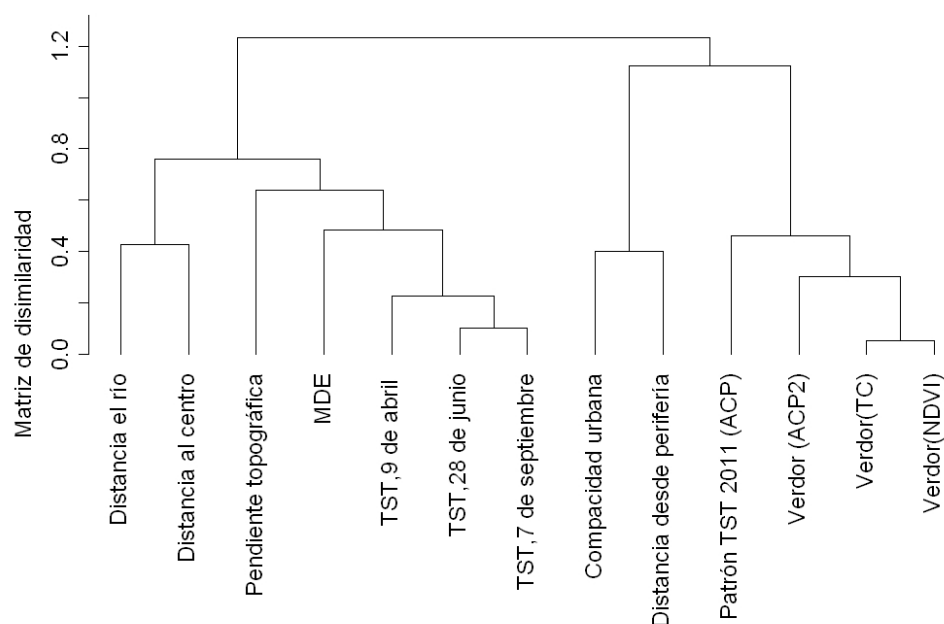


Figura 4.2 Dendrograma que agrupa todas las variables utilizadas para el estudio ICU.

La agrupación por conglomerados de las capas de información climática y de las capas de configuración urbana permite observar que existen variables con patrones muy similares, en ocasiones la asociación es evidente, por ejemplo los índices de verdor NDVI, Tasseled Cap y ACP2 o en las imágenes de TST, sin embargo en otras ocasiones la asociación entre capas no es tan evidente.

Para la elaboración del Mapa Analítico del Clima Urbano se han seleccionado cinco capas de información que describen de mejor manera la ICU de Zaragoza descartando las otras capas al considerarlas redundantes. Para describir la TST se ha utilizado el ACP multitemporal correspondiente a la agrupación de imágenes de finales del año 2011 (Sección 3.9.1), en el caso de la capa que contiene información de la vegetación se ha optado por utilizar el índice de verdor Tasseled Cap (Sección 3.10.2), la compacidad urbana (Sección 3.13.6) y la distancia desde la periferia (sección 3.13.5) muestran patrones muy similares sin embargo la capa de compacidad urbana contiene información asociada a los edificios de la ciudad por lo que se ha utilizado esta capa. Por último se ha considerado utilizar las capas de pendiente topográfica (Sección 3.13.3) y distancia a ríos (Sección 3.13.4) que están relacionadas en mayor medida con los patrones de ventilación sobre la ciudad.

En la figura 4.3 se muestra el dendrograma asociado a las cinco capas de información que describen el ICU de Zaragoza una vez realizada la simplificación de datos. Es interesante observar la formación de dos ramas dentro del dendrograma simplificado. Por una parte las capas de pendiente topográfica y distancia al río coinciden en mayor medida con la descripción del potencial dinámico del viento, mientras por la otra parte del dendrograma las capas de compacidad urbana, patrón TST y verdor describen en mayor medida a la descripción del aspecto térmico de la ciudad. Por último es conveniente mencionar que se han elegido estas cinco variables debido a que su obtención no es compleja y permite la replicabilidad del estudio ICU en diversas ciudades.

<i>Variable.</i>	<i>Comentarios.</i>
Patrón de TST (ACP1).	Describe aspecto térmico de la ciudad. La primera componente principal (ACP1) relaciona el patrón de TST de las imágenes de finales del 2009 y principios del 2010.
Verdor.	Describe aspecto térmico de la ciudad. La capa de de verdor es extraída mediante el índice Tasseled Cap.
Compacidad Urbana.	Describe aspecto térmico de la ciudad. La capa de compacidad urbana es un producto de elaboración propia generada a través de los SIG proporcionadas por la Dirección General de Catastro.
Pendiente topográfica.	Describe el potencial dinámico del viento. La capa de pendiente topográfica ha sido elaborada mediante un Modelo Digital de Elevaciones.
Distancia a ríos.	Describe el potencial dinámico del viento. La capa ha sido generada con la herramienta de cálculo de distancia con ayuda de SIG.

Tabla 4.1 Capas de información que describen el ICU de Zaragoza.



Figura 4.3 Dendrograma simplificado para el estudio ICU.

4.3 Categorización y jerarquización de variables.

La descripción de la ICU de acuerdo a las variables seleccionadas implica que estas puedan interpretarse en su conjunto.

Para ello, las variables han de ser normalizadas y posteriormente clasificadas en diferentes categorías dependiendo su influencia en la ICU. Ahora bien, en la ICU habrá variables que tienen una mayor influencia sobre otras por lo que también hace necesario realizar un proceso de jerárquico para determinar la carga factorial de cada una de ellas en un análisis global.

4.3.1 Categorización de variables.

La integración de un Mapa Analítico del Clima Urbano con variables de tan diverso origen implica realizar un proceso de normalización y categorización de todas las capas de información. Siendo el proceso de asignación por categorías el que reconoce el factor de impacto en la mitigación de un clima urbano elevado.

4.3.1.1 Patrón de TST (ACP).

El patrón de TST reconoce el calor almacenado en las distintas cubiertas urbanas. Se ha considerado que las superficies con menor TST tienen un mayor grado de atenuar de la ICU.

<i>Patrón TST 2011 (ACP1)</i>	Factor de impacto
Muy alto	0
Alto	1
Regular Alto	2
Regular Bajo	3
Bajo	4
Muy Bajo	5

Tabla 4.2 Categorización de la TST (ACP1) en la ciudad de Zaragoza, España.

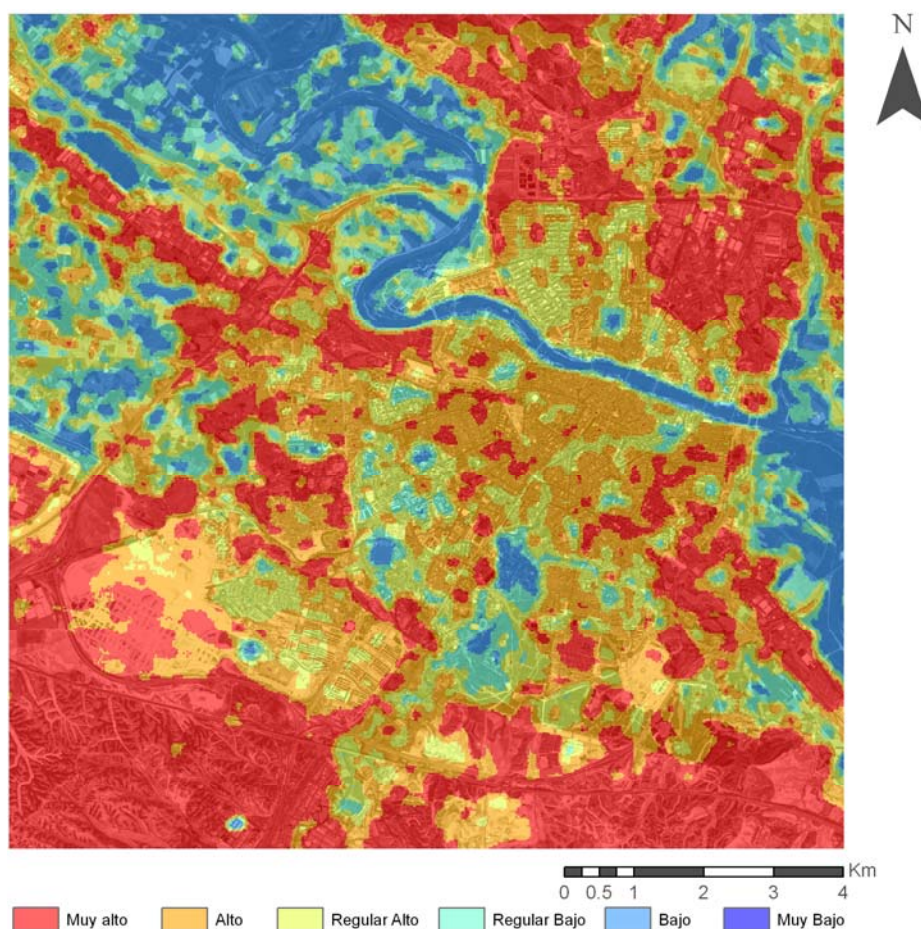


Figura 4.4 Clasificación del patrón de TST (ACP1) en la ciudad de Zaragoza, España.

4.3.1.2 Verdor (Tasseled Cap).

En cuanto al verdor, se ha asignado una nula capacidad de mitigación del clima urbano a los espacios sin vegetación, por el contrario a las parcelas agrícolas se les ha asignado un alto factor de impacto para mitigar la isla de calor.

<i>Verdor (TC)</i>	Factor de impacto
Sin vegetación	0
Vegetación urbana	1
Vegetación abundante	2
Parcelas agrícolas	3

4.3 Categorización del verdor en la ciudad de Zaragoza, España.

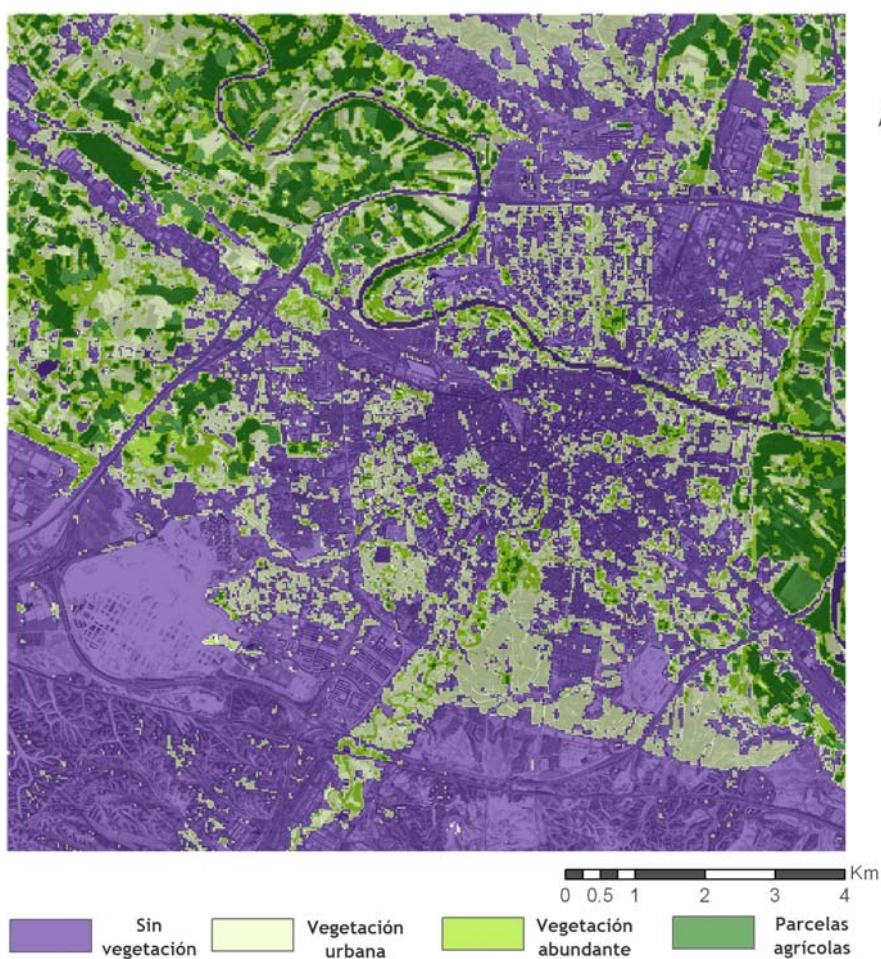


Figura 4.5 Clasificación del verdor urbano en la ciudad de Zaragoza, España.

4.3.1.3 Compacidad Urbana.

Las zonas altamente edificadas almacenan una gran cantidad de calor incrementando la carga térmica urbana debido a la captura de radiación durante el día y la posterior liberación de calor durante la noche. Por lo que las zonas con baja compacidad tendrán un efecto positivo en la ICU.

<i>Compacidad Urbana</i>	Factor de impacto
Alta	0
Media	1
Baja	2
Muy Baja	3
Sin edificación	4

Tabla 4.4 Categorización de la compacidad urbana en la ciudad de Zaragoza, España.

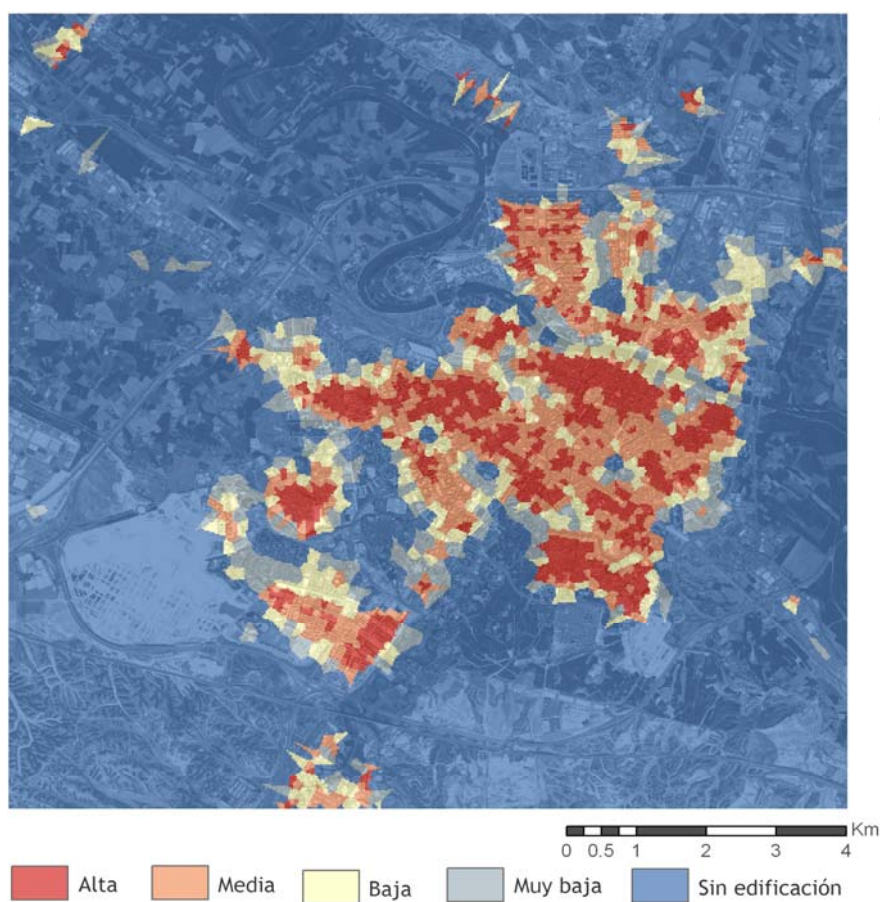


Figura 4.6 Clasificación de la compacidad urbana en la ciudad de Zaragoza, España.

4.3.1.4 Pendiente topográfica.

El potencial dinámico del viento en las zonas urbanas se incrementa proporcionalmente al desnivel topográfico (Gridharan, 2005). Razón por la cual se ha asignado un factor de impacto positivo cuando la pendiente topográfica es mayor a 5°.

<i>Pendiente topográfica</i>	Factor de impacto
Pendiente < 5 %	0
Pendiente ≥ 5 %	1

Tabla 4.5 Categorización de las pendientes topográficas en la ciudad de Zaragoza, España.

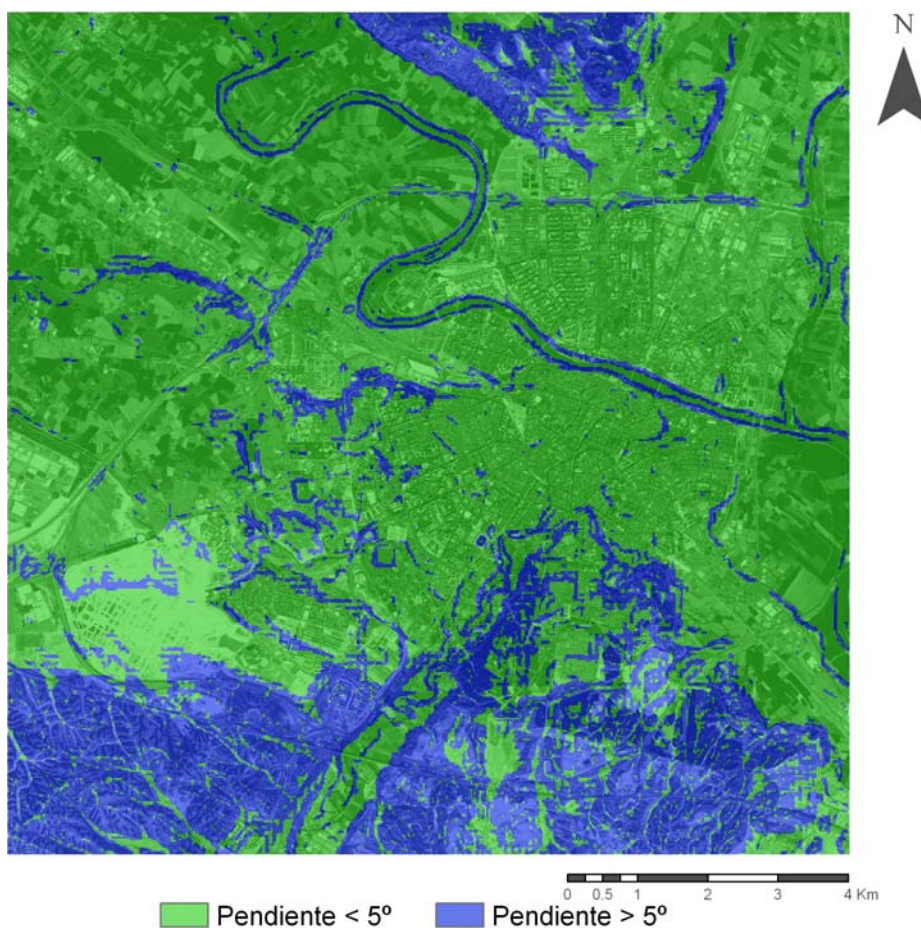


Figura 4.7 Clasificación de la pendiente del terreno para la ciudad de Zaragoza, España.

4.3.1.5 Distancia a ríos.

Si bien los ríos que atraviesan la ciudad proporcionan humedad a su entorno más cercano, en mayor medida facilitan el flujo del aire. Las zonas urbanas ubicadas a menor distancia de los ríos tendrán un alto potencial dinámico del viento reduciendo la ICU.

<i>Distancia al río</i>	Factor de impacto
Distancia > 1 km	0
Distancia ≤ 1 km	1

Tabla 4.6 Categorización de la distancia a los ríos en la ciudad de Zaragoza, España.

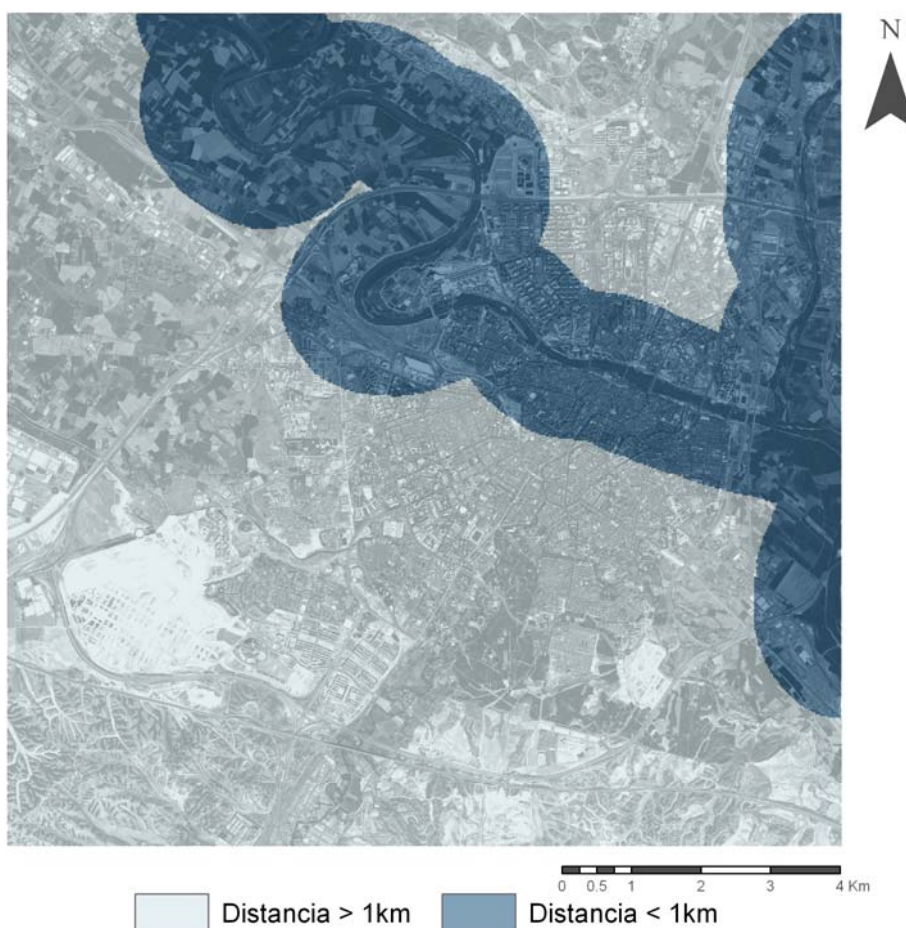


Figura 4.8 Clasificación de la distancia a ríos para la ciudad de Zaragoza, España.

4.3.2 Proceso Analítico Jerárquico para la obtención de las cargas factoriales.

Para la elaboración del Mapa Analítico del Clima Urbano normalmente hay que realizar una ponderación de cada una las capas de información para determinar su grado influencia en la visión global del clima urbano. Esta ponderación se realiza de manera subjetiva y con carácter global en base a la base a la experiencia el tomador de decisiones. No existe un enfoque objetivo en esta ponderación y diferentes analistas definirían diferentes ponderaciones aunque resulte obvio que las diferencias serían mínimas si se partía de un conocimiento previo suficiente. Trabajos como el de Ng et al. (2009), o la determinación del mapa de clima urbano de la ciudad de Bilbao realizado por Acero (2011) confirman este imperativo. En todo caso, para minimizar el carácter subjetivo, resulta interesante utilizar herramientas que ayuden al tomador de decisiones a determinar el grado de influencia de cada una las capas de información que describen el clima urbano. Para ello se propone utilizar el Proceso Analítico Jerárquico desarrollado por Saaty (1980) como método de ponderación de las distintas capas de información que describen en mejor manera el clima urbano.

El Proceso Analítico Jerárquico requiere que el tomador de decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios realizando comparaciones pareadas entre elementos permitiendo de manera eficiente organizar la información respecto de un problema y asignando una ordenación jerárquica de acuerdo a la importancia de dichos elementos. Las comparaciones por pares es la base fundamental del proceso analítico jerárquico, en el cual se utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para evaluar las preferencias relativas de dos elementos (Tabla 4.7).

<i>Planteamiento de la preferencia</i>	<i>Evaluación Numérica</i>
Igualmente preferible	1
Entre igual y moderadamente significativo	2
Moderadamente significativo	3
Entre moderadamente y fuertemente significativo	4
Fuertemente significativo	5
Entre fuertemente y muy fuertemente significativo	6
Muy fuertemente significativo	7
Entre muy fuertemente y extremadamente significativo	8
Extremadamente significativo	9

Tabla 4.7 Criterios de evaluación en comparaciones pareadas (Saaty, 1980).

De igual manera en relación al estudio ICU, para obtener el grado de influencia de cada una de las capas de información que describen en mayor medida el comportamiento térmico y el potencial dinámico del viento, se han comparado las capas de información por pares, es decir, se ha comparado la importancia de una capa con respecto a otra.

	<i>Patrón TST 2011 (ACP)</i>	<i>Verdor (TC)</i>	<i>Compacidad Urbana</i>	<i>Pendiente topográfica</i>	<i>Distancia al río</i>	<i>Carga Factorial</i>
<i>Patrón TST 2011 (ACP)</i>	1	2	2	1	5	0.304
<i>Verdor (TC)</i>	1/2	1	2	1/2	5	0.204
<i>Compacidad Urbana</i>	1/2	1/2	1	1/2	3	0.136
<i>Pendiente topográfica</i>	1	2	2	1	5	0.304
<i>Distancia al río</i>	1/5	1/5	1/3	1/5	1	0.051

Tabla 4.8 Matriz de comparación pareada de elementos descriptivos del efecto ICU.

En la tabla 4.8 se muestra la matriz de comparación de las principales capas de información que describen la ICU de Zaragoza. Saaty (1980) ha demostrado que el eigenvector normalizado de la matriz de comparación puede ser considerado como el vector de prioridades y puesto que se realiza una normalización la suma de todos los elementos del vector es igual a 1. Así pues, el vector de prioridades muestra los pesos relativos de las variables que describen la ICU.

Una consideración importante en términos de calidad de la decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de las comparaciones binarias. Se debe tener en cuenta que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr y que es de esperar cierta inconsistencia, después de todo son juicios rendidos por seres humanos. Si el grado de consistencia es aceptable puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones binarias antes de continuar el análisis. Saaty (1980) ha demostrado que la consistencia de una matriz de comparación, también conocida como Razón de Consistencia, se puede conocer determinando la relación entre un Índice de Consistencia (IC) generado con los datos del correspondiente análisis, con

respecto a un Índice Aleatorio producto de aplicar el (IC) a un gran número comparaciones binarias aleatorias.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (4.1)$$

Donde:

El índice de consistencia se calcula como:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.2)$$

λ_{max} = Máximo eigenvalor

N número de elementos a comparar

Los Índices aleatorios determinados por Saaty (1980) se muestran en la tabla 4.9.

Nº de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio (IA)	0.00	0.00	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Tabla 4.9 Índices aleatorios para determinar consistencia de PAJ (Saaty,1980).

La Razón de Consistencia (RC) está diseñada de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; en cuyo caso el tomador de decisiones debe reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de las comparaciones binarias. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones.

$RC \leq 0.10$: *Consistencia razonable*

$RC > 0.10$: *Inconsistencia*

En concreto la Razón de Consistencia de la matriz de comparación del ICU de Zaragoza ha sido igual a $RC= 0.02$ por lo que se pueden considerar que tanto la comparación entre variables como la jerarquización guardan una coherencia adecuada.

4.4 Mapa Analítico del Clima Urbano Zaragoza

El Mapa Analítico del Clima Urbano de la ciudad de Zaragoza, como aplicación de la metodología definida, es el producto de la integración una serie de capas que describen en mayor medida el aspecto térmico y el potencial dinámico del viento. Inicialmente, para entender toda la información generada en su conjunto se ha realizado un proceso de normalización y clasificación cada una de las capas función de un Factor de Impacto de mitigación del clima urbano. Seguidamente se ha determinado la carga factorial de cada una de las variables mediante un proceso analítico jerárquico con el objetivo de determinar su porcentaje de implicación en la descripción global del clima urbano. La última parte del proceso en la obtención del Mapa Analítico del Clima Urbano es la integración de cada uno de los Factores de Impacto de cada una de las variables con su respectiva Carga Factorial.

4.4.1 Ecuación General del Mapa Analítico de Clima Urbano.

A continuación se presenta una ecuación general capaz describir el Mapa Analítico del Clima Urbano (Ecuación 4.3):

$$ICU = \sum_{x=1}^n \left(\frac{FI_x}{N_x - 1} \right) CF_x \quad (4.3)$$

Donde:

FI_x = Factor de impacto en cada Nivel Digital variable x obtenido tras el correspondiente Proceso Analítico Jerárquico.

N_x = Número de categorías variable x .

CF_x = Carga factorial variable x . ; $CF_x \geq 0$; $\sum_{x=1}^n CF_x = 1$

n = Número total de variables de estudio obtenido tras el correspondiente análisis por conglomerados.

4.4.2 Ecuación del Mapa Analítico de Clima Urbano para Zaragoza, España.

En este sentido la ecuación 4.4 describe el Mapa Analítico del Clima Urbano de la ciudad de Zaragoza.

$$\begin{aligned} ICU = & \left(\frac{FI_{TST}}{5} \right) \times CF_{ACP} + \left(\frac{FI_{Verdor}}{3} \right) \times CF_{Verdor} \\ & + \left(\frac{FI_{Cohesión}}{4} \right) \times CF_{Cohesión} + (FI_{Pendiente}) \times CF_{Pendiente} \\ & + (FI_{Distancia a rios}) \times CF_{Distancia a rios} \end{aligned} \quad (4.4)$$

La implementación de la ecuación 4.4 considerando los Niveles Digitales de las variables que explican en mayor medida la ICU generan la capa raster que explica el Mapa Analítico del Clima Urbano Zaragoza (Figura 4.9).

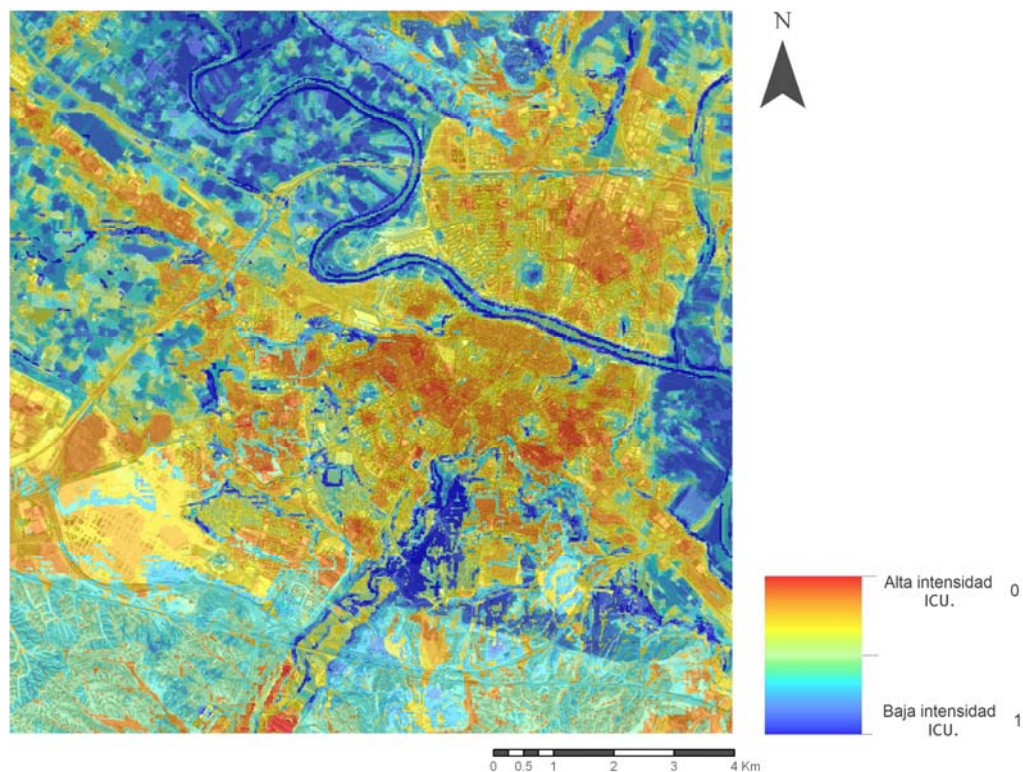


Figura 4.9 Mapa Analítico del Clima Urbano normalizado.

En la figura 4.9 se muestra el Mapa Analítico del Clima Urbano en una escala numérica de 0 a 1, mostrando las zonas con menor intensidad de la ICU valores cercanos a 1 y las zonas con mayor intensidad de la ICU presentando valores cercanos a 0. Aunque esta representación es razonable, es adecuado realizar un proceso de asignación de categorías de la intensidad del clima urbano. Para ello es conveniente utilizar un indicador de confort térmico como elemento sinérgico para clasificar el Mapa Analítico de Clima Urbano. De acuerdo a la metodología propuesta por Ren et al. (2008) es posible utilizar el índice PET¹³.

¹³ El índice PET (Physiological Equivalen Temperature) es un índice que representa la temperatura ambiente de referencia basado en el modelo de transferencia de calor MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals) que combina variables climáticas y psicológicas como temperatura del aire, humedad, velocidad del viento, entre otros, para proveer información sobre el confort térmico (Höpe, 1999). El índice PET es preferible a otros índices de confort térmico, como el índice PMV (Predicted Mean Vote) propuesto por Fanger et al. (1970), debido a que utiliza una unidad ampliamente conocida (°C) y facilita la comprensión de resultados a los planificadores urbanos (Matzatakis et al. 1999).

4.4.3 Clasificación Mapa Analítico del Clima Urbano de Zaragoza.

La asignación por categorías se ha realizado mediante un proceso de clasificación de cubiertas urbanas y cubiertas vegetales previo conocimiento del medio y mediante la verificación y validación del índice PET con las seis estaciones meteorológicas existentes. Esta validación permite sustituir el análisis de ICU en términos exclusivamente de temperatura de bulbo seco por un análisis de situación de confort determinado por el valor del índice PET lo que lleva a un análisis más adecuado de los efectos a considerar, por ejemplo en el caso de cañón urbanos donde la velocidad del viento puede alcanzar valores de hasta 20 m/s.

Las distintas categorías asociadas a la sensación térmica están basadas en la ecuación de balance de calor bajo condiciones estacionarias estables. Considerando que la magnitud de las variables en su conjunto aumentan o disminuyen el índice PET. Se ha establecido que cuando el conjunto de variables aumentan el valor PET por más de 1 °C el nivel digital analizado corresponde una categoría superior; o si el conjunto de variables disminuyen el valor PET por más de 1 °C el nivel digital analizado corresponde a una categoría inferior.

La relación de la temperatura del aire y PET es lineal (Ren et al. 2008) es aproximadamente lineal en el rango de temperaturas considerado (Figura 4.10) y un aumento de temperatura del aire por 1 °C corresponde aproximadamente a la subida valor PET aproximadamente 1 °C.

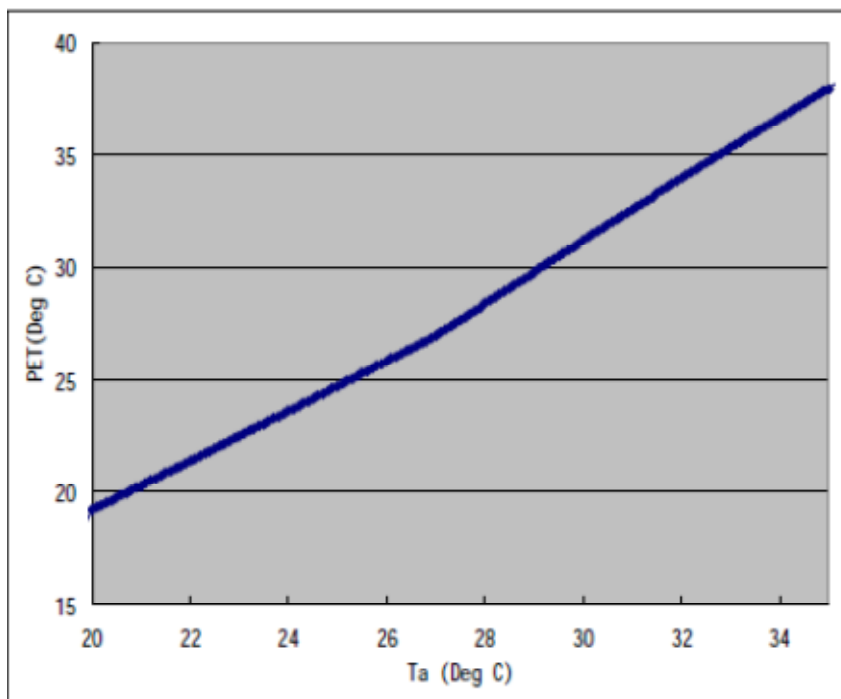


Figura 4.10 Relación entre temperatura del aire y PET (Ren et al. 2008).

Es conveniente saber que el valor PET es inversamente proporcional a la velocidad del viento, es decir, un aumento de velocidad del viento de 0,5 a 1,5 m / s tiene un efecto de PET disminución de aproximadamente 2 °C (Figura 4.11).

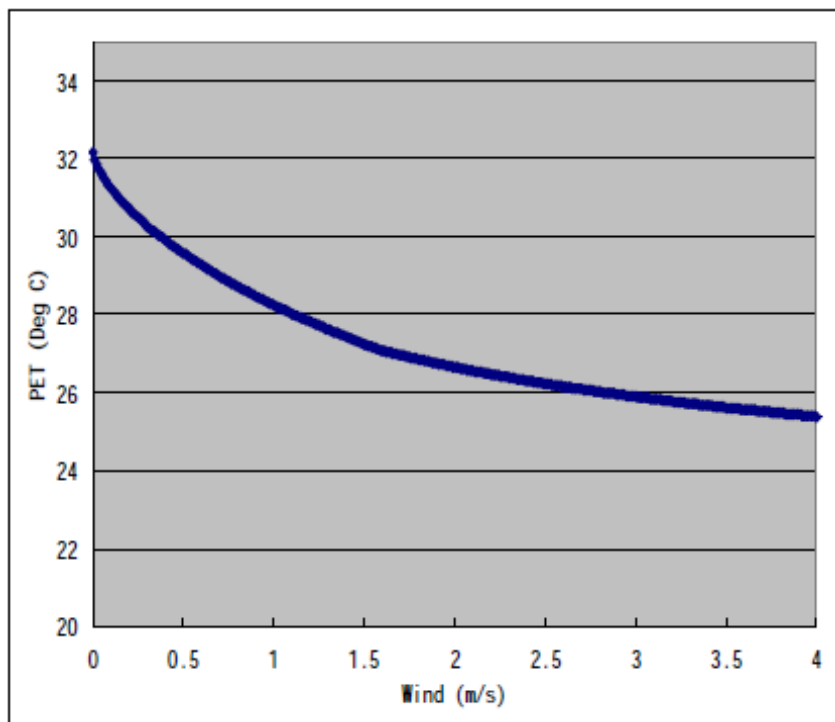


Figura 4.11 Relación entre velocidad del viento y PET (Ren et al. 2008).

El análisis del impacto del confort térmico de acuerdo a la clasificación de cubiertas urbanas y cubiertas vegetales con su respectiva correlación con el índice PET, ha derivado en ocho categorías que describen el clima urbano (Tabla 4.9).

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>	Δ PET[°C]	<i>Impacto en el confort térmico</i>
1	Carga térmica moderadamente negativa y buen potencial dinámico	-2	Moderado
2	Carga térmica ligeramente negativa y buen potencial dinámico	-1	Suave
3	Baja carga térmica y buen potencial dinámico	0	Neutral (Confort)
4	Esporádica carga térmica y esporádico potencial dinámico	1	Suave
5	Carga térmica moderada y esporádico potencial dinámico	2	Moderado
6	Carga térmica moderadamente alta y bajo potencial dinámico	3	Moderadamente alto
7	Alta carga térmica y bajo potencial dinámico	4	Alto
8	Carga térmica muy alta y bajo potencial dinámico	5	Extremadamente alto

Tabla 4.10 Impacto del clima urbano (Ren et al. 2008)

Categoría 1. Carga térmica moderadamente negativa y buen potencial dinámico.

En esta categoría se identifican los menores valores de intensidad del clima urbano. En tipo de espacios tiene un gran potencial de refrigeración evaporativa debido a la cercanía del agua. Como resultado la temperatura del aire es usualmente baja.

Categoría 2. Carga térmica ligeramente negativa y buen potencial dinámico.

Este tipo de espacios están caracterizados, en su mayoría, por tener un alto contenido de vegetación con regadío, en su mayoría parcelas agrícolas, además son zonas con una gran capacidad de remover el aire debido a estar cerca de los ríos y tener pendientes significativas del terreno. Otra característica de este tipo de espacios es la de no poseer edificación cercana.

Categoría 3. Baja carga térmica y buen potencial dinámico.

Con características muy similares a la categoría 2, pero con una ligera capacidad de remover el calor urbano. En esta categoría se identifican parcelas agrícolas, parques y espacios abiertos.

Categoría 4. Esporádica carga térmica y esporádico potencial dinámico.

En este grupo se encuentran, por lo general, parcelas de secano y suelos desnudos edificados. Esta categoría sirve como límite entre los parques y jardines con respecto al medio urbano.

Categoría 5. Carga térmica moderada y esporádico potencial dinámico.

En esta categoría se encuentran por una parte zonas con elevado desnivel topográfico, tienen la característica de poseer una alta temperatura superficial que puede ser disipada al estar ubicados en zonas con potencial eólico. Por otra parte se empiezan a reconocer edificios ubicados en espacios con baja compacidad urbana y altos niveles de vegetación urbana. Así mismo estos edificios están localizados en lugares donde se favorece la ventilación.

Categoría 6. Carga térmica moderadamente alta y bajo potencial dinámico.

Estas zonas reconocen edificios con baja compacidad urbana y elevados niveles de vegetación urbana. La localización de estos edificios es favorita por tener en la proximidad parques, ríos, o zonas con desnivel topográfico. Cabe la pena mencionar que en esta categoría se empiezan a reconocer los barrios: ACTUR, Parque Goya y Montecanal. Los primeros dos, son barrios que desde su concepción se diseñaron con conceptos de urbanismo. Por último el barrio de Montecanal en su mayoría posee viviendas unifamiliares con jardines y por su localización es favorecido por el cierzo.

Categoría 7. Alta carga térmica y bajo potencial dinámico.

En esta categoría se encuentran zonas con mediana compacidad urbana, se reconocen ciertos problemas de clima urbano debido a la falta de vegetación y su consecuente elevada temperatura superficial. En cuanto a la evaluación del clima urbano de Zaragoza se puede indicar que los edificios y barrios que están localizados en esta categoría no necesitan una actuación urgente en cuanto a la mitigación del clima urbano.

Categoría 8. Carga térmica muy alta y bajo potencial dinámico.

Este tipo de espacios muestran una alta intensidad del clima urbano, son zonas con nula vegetación y elevadas temperaturas superficiales. Están caracterizados por tener una alta compacidad urbana y dificultar la ventilación. En relación a la ciudad de Zaragoza se reconocen barrios con elevada densidad edificada como el barrio Delicias y San José. Así como edificios contenidos dentro polígonos industriales.

En la figura 4.12 se muestra el Mapa Analítico del Clima Urbano una vez realizada la clasificación en base al impacto en el confort térmico.

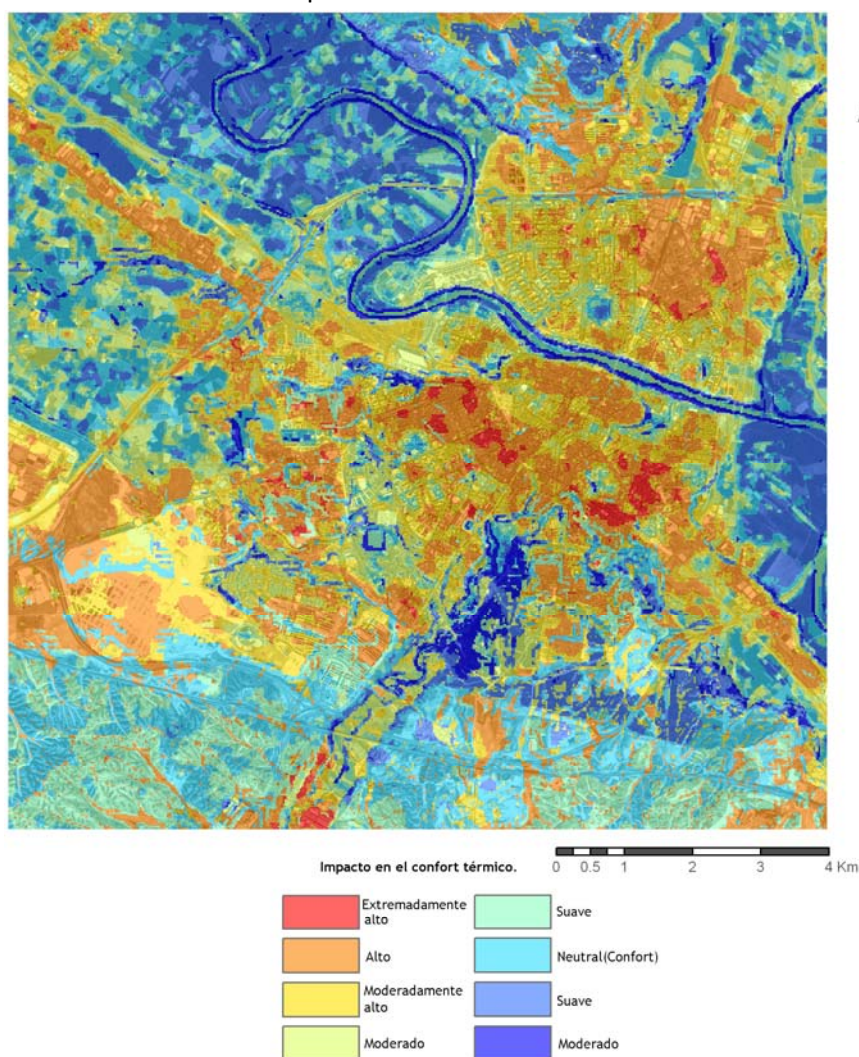


Figura 4.12 Clasificación del impacto en el confort térmico para la ciudad de Zaragoza. (Mapa Analítico del Clima Urbano)

4.5 Calibración y validación de Mapa Analítico del Clima Urbano.

Diferentes factores climáticos y factores urbanos trabajan en sinergia para determinar el clima urbano. El análisis por conglomerados ha permitido reconocer las variables capaces de representar la ICU eliminando información redundante y el proceso analítico jerárquico ha determinado el poder explicativo de cada una de estas variables. Posteriormente la clasificación del impacto del confort térmico ha reconocido un diferencial PET, bajo condiciones estacionarias estables, de acuerdo a los distintos tipos de cubiertas urbanas y vegetales. Por último es necesario llevar a cabo un proceso de calibración y validación del modelo que determina la ICU relacionando el impacto en el confort térmico con medidas experimentales. El proceso de calibración del modelo brinda la posibilidad de generar un Mapa Analítico del Clima Urbano optimizado.

El Mapa Analítico del Clima Urbano se ha calibrado realizando la diferencia de temperatura registrada entre una sonda de referencia y las demás sondas meteorológicas y su posterior comparación con el índice Δ PET en condiciones estacionarias estables. En este sentido se utilizó de referencia la sonda localizada en el aeropuerto.

La clasificación de impacto en el confort térmico coincidió con las diferencias de temperaturas obtenidas donde estaban localizadas las sondas meteorológicas. Sin embargo es importante mencionar que el número de sondas de temperatura que se han utilizado en este proyecto es limitado (seis estaciones meteorológicas), por lo que sería de gran interés para trabajos futuros aumentar el número de sondas de temperatura.

Instalar un número significativo de sondas de temperatura sobre distintos tipos de cubiertas urbanas y vegetales brinda el suficiente rigor estadístico para determinar el grado de error entre las predicciones obtenidas por el Mapa Analítico del Clima Urbano y los datos reales registrados en las sondas de temperatura. En este sentido la regresión de mínimos cuadrados (R^2), el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) son modelos adecuados para valorar la exactitud de la predicción obtenida por el Mapa Analítico del Clima Urbano.

$R^2 =$ *Coeficiente del momento de correlacion del producto Pearson*

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (4.5)$$

$$RMSE = (N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2)^{0.5} \quad (4.6)$$

Donde:

N es el número de observaciones, O es el valor observado y P es el valor predicho en el Mapa Analítico del Clima Urbano.

4.6 Diagrama metodológico de elaboración de Mapa Analítico del Clima Urbano.

En la figura 4.13 de muestra el diagrama que resume la metodología planteada en esta tesis doctoral.

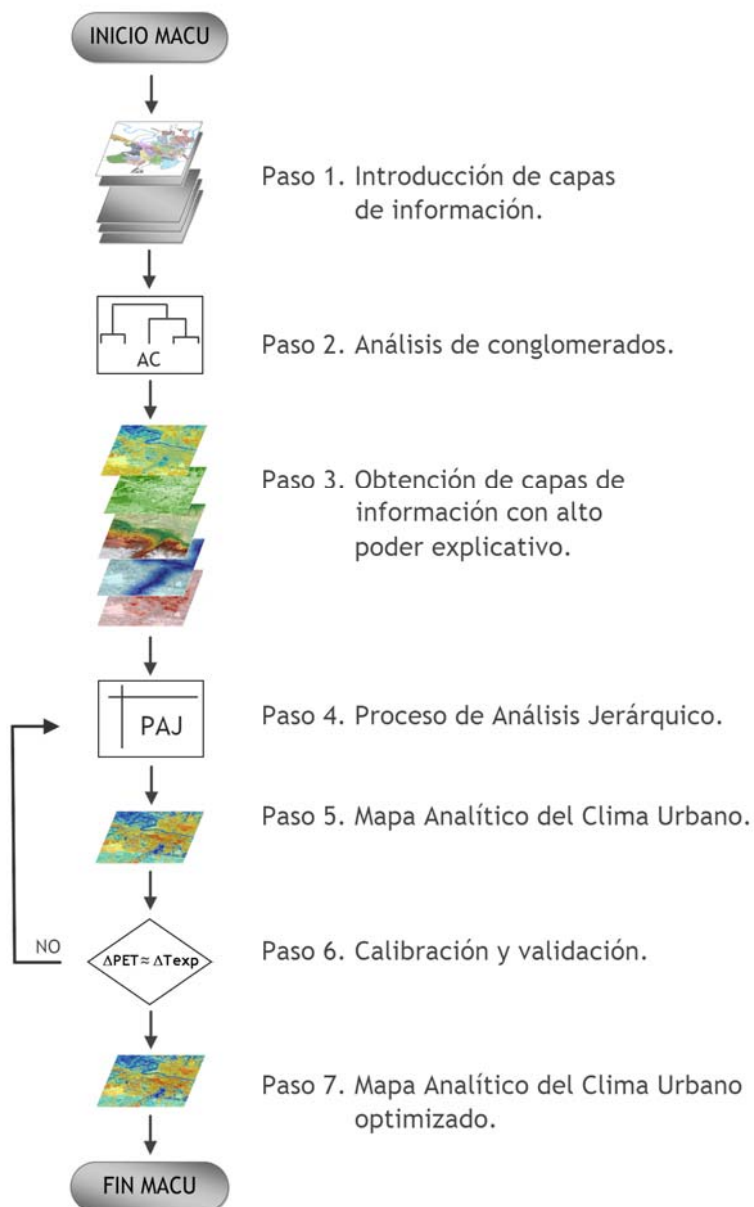


Figura 4.13 Metodología elaboración Mapa Analítica del Clima Urbano.

4.7 Mapa Recomendación del Clima de Zaragoza.

El Mapa Recomendación del Clima Urbano surge tras haber finalizado la evaluación y modelado del clima urbano en un Mapa Analítico del Clima Urbano. Si bien, se han identificado las zonas de la ciudad que presentan los mayores niveles de intensidad del clima urbano y las zonas con menor intensidad de clima urbano, esta clasificación conviene que sea reagrupada de acuerdo al tipo de procedimiento que se necesita realizar a nivel urbano. Esta reclasificación ayudará al tomador de decisiones a saber dónde y cómo intervenir. Es importante mencionar que el tomador de decisiones puede ser capaz de modificar la recalificación sugerida en función de sus necesidades y capacidades.

La recomendación para mitigar el clima urbano sugiere tres tipos de acciones:

- PRESERVAR, que consiste en mantener sin ningún tipo de actuación los espacios que no presentan una influencia del clima urbano significativa
- VIGILAR, es decir mantener en observación las zonas y edificios que muestran alto niveles de intensidad de clima urbano pero que no requieren una actuación urgente , y
- PROCEDER, consistente en la localización de aquellas zonas urbanas y edificios que muestra rasgos de una intensidad extrema del clima urbano por lo que es recomendable tomar medidas inmediatas de actuación.

Así, en relación con el índice PET e puede establecer una escala correspondiente a estos tres tipos de acciones (Tabla 4.11).

<i>Intensidad de la ICU</i>	<i>Recomendación</i>	<i>ΔPET [°C]</i>
Moderado	Preservar	-2º
Suave		-1º
Neutral (Confort)		0º
Suave	Vigilar	1º
Moderado		2º
Moderadamente alto		3º
Alto	Proceder	4º
Extremadamente alto		5º

Tabla 4.11 Medidas de actuación entorno a la intensidad del clima urbano.

4.7.1 Reconocimiento de posibles zonas de actuación.

El Mapa de Recomendación del Clima Urbano muestra las zonas de la ciudad donde es necesario tomar acciones para mitigar el clima urbano. Resulta así de sumo interés cuando se tiene pensado llevar a cabo un plan de acción de ordenación y rehabilitación urbana elaborar este tipo de mapas ya que es necesario tener herramientas de apoyo para reconocer las zonas preferentes de actuación, y una vez reconocidas, hacer posible el presentar alternativas de mitigación del clima urbano. Resumiendo, el tomador de decisiones que llevará a cabo una actuación urbana necesita saber dónde y cómo proceder. Si además la actuación puede evaluarse en términos de eficiencia y ahorro energéticos los argumentos a favor de dicha actuación se refuerzan (Figura 4.14)

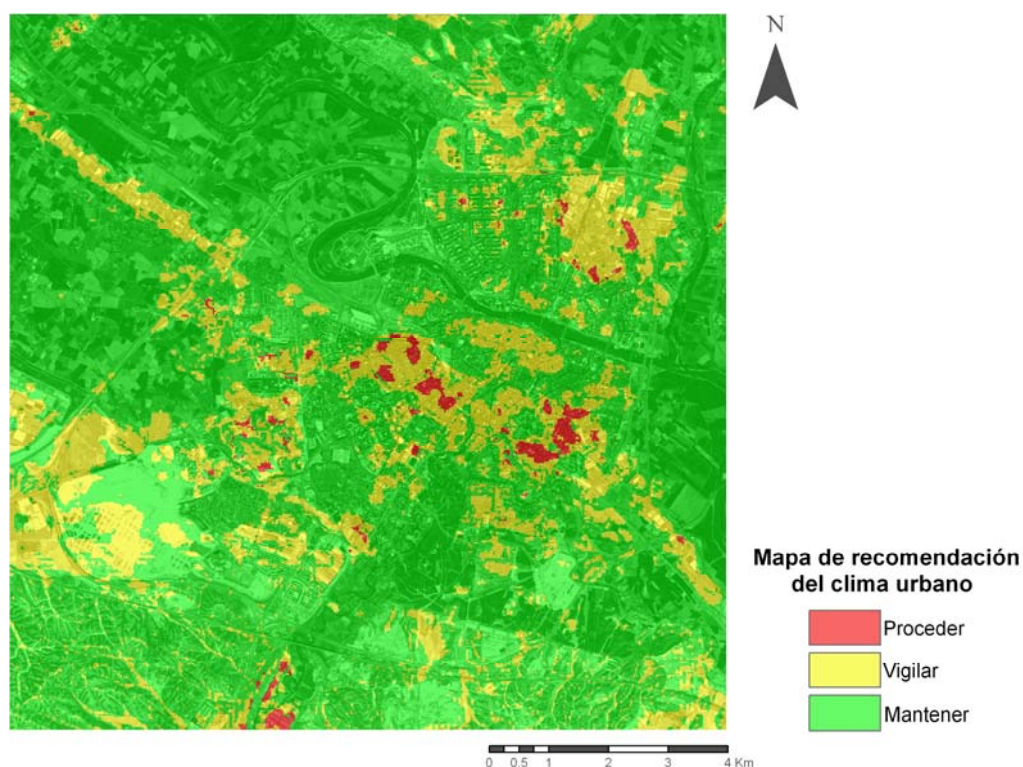


Figura 4.14 Mapa de Recomendación del Clima Urbano para la ciudad de Zaragoza, España¹⁴.

Como se ha demostrado anteriormente, los Sistemas de Información Geográfica son una excelente herramienta para el manejo y uso de la información pues con ellas dispondremos de mayor capacidad de decisión sobre dónde actuar. En este sentido, la integración de nuevas capas de información sobre el Mapa de Recomendación del Clima Urbano mostrará un Mapa de Recomendación Optimizado y el tomador de decisiones tendrá con mayor claridad donde llevar a cabo acciones de mitigación del clima urbano, siendo imprescindible la colaboración multidisciplinar de ingenieros,

¹⁴ El histograma de color la figura 4.14 ha sido filtrado reconociendo los valores de ICU extremadamente altos.

urbanistas, geógrafos, autoridades y tomadores de decisiones, para la obtención y distribución de información.

Gaddes (1915), fue el primer autor que manifestó los peligros de la elaboración de planes urbanos sin un análisis previo, aportando de esta manera un aspecto esencial al pensamiento urbanístico y territorial: la necesidad de sustentar la planificación en un conocimiento previo a la realidad.

La tabla 4.12 muestra los elementos y sistemas que directa o indirectamente inciden en la planificación o rehabilitación urbana. Debido a la creciente complejidad que adquiere integrar estas componentes a un análisis del clima urbano, cada uno de estas componentes, representada de manera vectorial debe ser transformada a su correspondiente a capa raster. Esto con el objetivo de poder realizar un tratamiento y filtrado de datos homogéneo al Mapa de Recomendación Urbano.

COMPONENTES INCIDENTENTES EN LA PLANIFICACION Y REHABILITACIÓN

ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y FÍSICOS

RELIEVE: Contornos, causes, tierras bajas, terrenos no aptos para urbanización, terrenos inundables, terrenos inestables, áreas urbanizadas.

CLIMA: Precipitación, horas de sol, temperaturas extremas, viento, niebla.

HISTORIA Y CRECIMIENTO: Periodos y localización del desarrollo urbano.

LA POBLACIÓN Y SU EMPLEO

POBLACIÓN Y CAMBIO: Densidad y distribución de la población.

ESTRUCTURA DE EDAD: Grupos de edad y sexo; previsión.

ESTRUCTURA DEL EMPLEO: desglose del empleo por sexo y edad.

LEGISLACIÓN, ADMINISTRACIÓN Y FINANCIACIÓN.

VALOR CATASTRAL Y PROPIEDAD: Inmuebles alquilados de propiedad pública, eclesiástica, privada; inmuebles ocupados por el propietario; desglose general del valor catastral.

SERVICIOS PÚBLICOS: Administración local y central; educación; hospitales; policía.

FINIANCIACIÓN DE LA INTERVENCIÓN: Cantidad, forma, retorno de la inversión.

USO ACTUAL DEL SUELO Y EDIFICACIÓN

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL USO DEL SUELO: Residencial, Comercial, Industrial espacio libre y límites del suelo urbanizable.

USOS DE SUELO A DETALLE: Residencial, tiendas, oficinas, edificios, públicos, industrias especiales, espacios libres, solares vacíos.

SUPERFICIE CONSTRUIDA Y CONDICIÓN: Superficie construida, condición y periodo de vida funcional, desempeño energético.

RECURSOS NATURALES: Zonas o fuentes de agua, agricultura, pesca, recursos en explotación y no explotados.

USO AGRICOLA DEL DUELO: Bosques y zonas arboladas, brezal, pastizal, praderas, tierras de cultivo, frutales y huertas

ESTRUCTURA COMUNITARIA: Vías principales de tráfico, lugares de afluencia pública.

Tabla 4.12 Componentes incidentes en la planificación y rehabilitación.

Por ejemplo, si se desea llevar a cabo un plan de rehabilitación exclusivamente en los edificios de uso residencial (Figura 4.15), en el Mapa de Recomendación del Clima Urbano se lleva a cabo un filtrado de la información donde únicamente se presentan edificios de uso residencial (Figura 4.16).

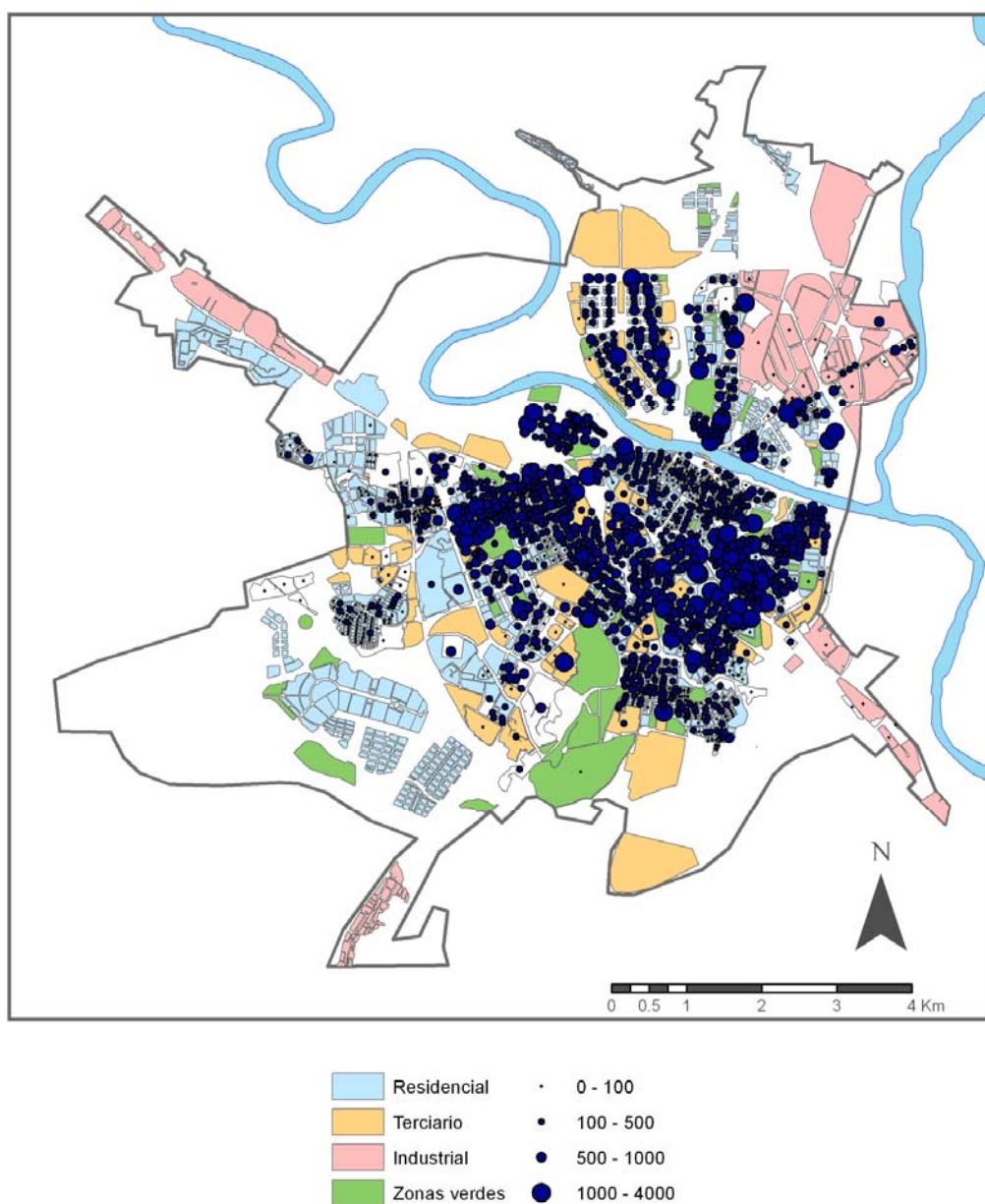


Figura 4.15 Clasificación de la edificación y densidad de población por edificio, Zaragoza, España.

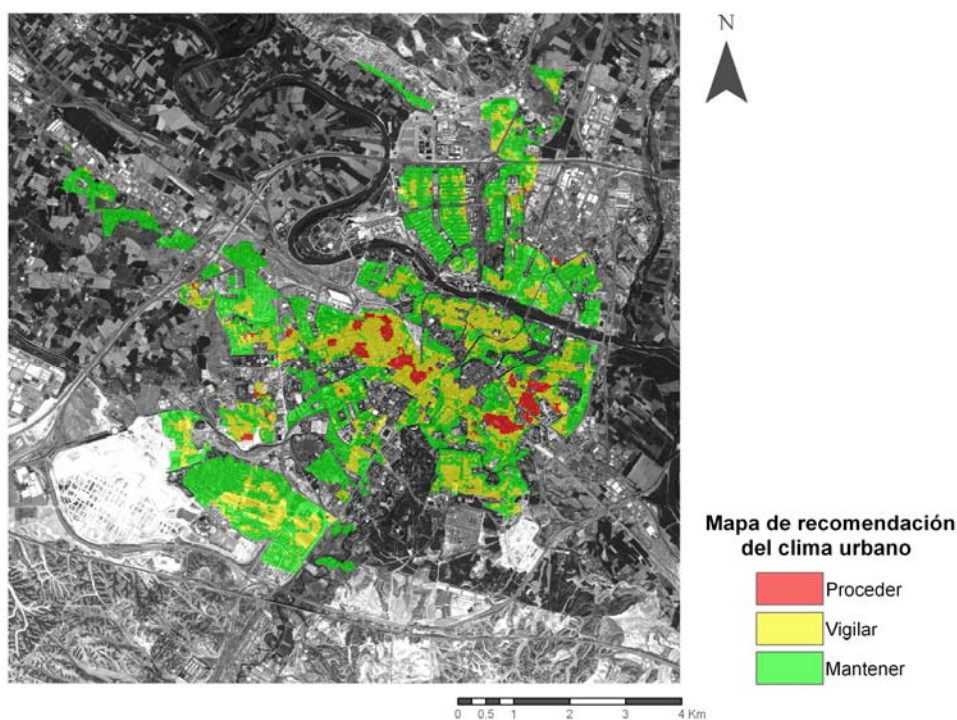


Figura 4.16 Mapa de Recomendación del Clima Urbano actuando sobre edificios del sector residencial para la ciudad de Zaragoza, España¹⁵.

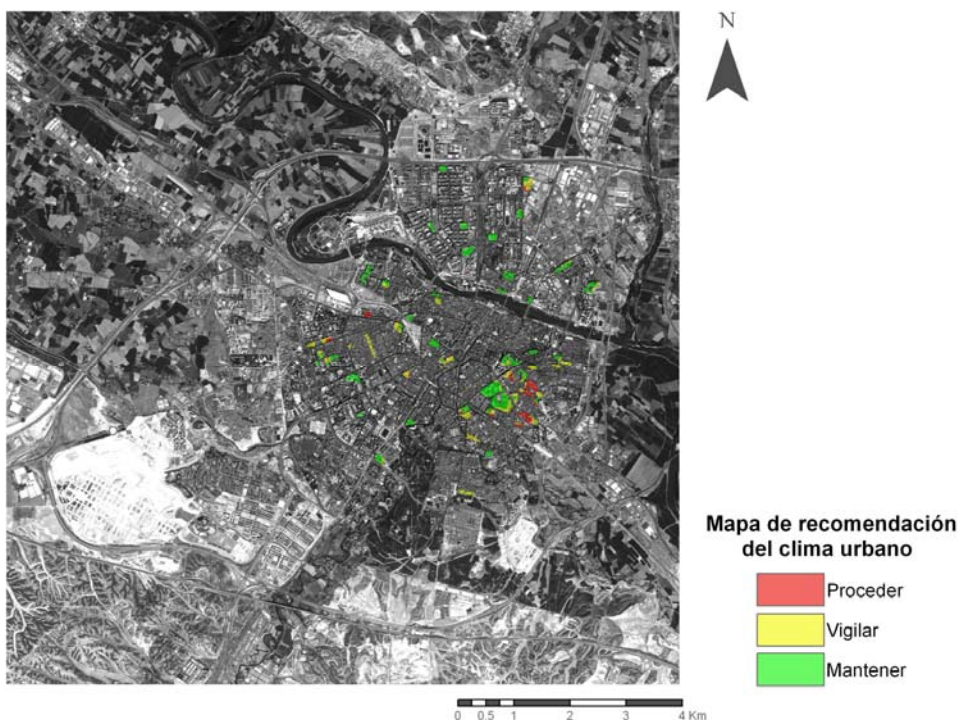


Figura 4.17 Mapa de Recomendación del Clima Urbano actuando sobre edificios del sector residencial con densidad de población superior a los 1000 habitantes por parcela edificada, Zaragoza, España¹⁶.

¹⁵ El histograma de color la figura 4.16 ha sido filtrado reconociendo los valores de ICU extremadamente altos.

¹⁶ El histograma de color la figura 4.17 ha sido filtrado reconociendo los valores de ICU extremadamente altos.

Debe entenderse que la construcción de un Mapa de Recomendación del Clima Urbano en base al filtrado de componentes incidentes en la planificación y rehabilitación no tiene una solución única y de acuerdo a los recursos y necesidades de los tomadores de decisiones se tendrá una u otra solución sobre donde llevar a cabo las actuaciones de mitigación del clima urbano.

Los ejemplos anteriores demuestran la posibilidad de reconocer zonas de actuación de rehabilitación o planificación urbana en base a criterios específicos. Si bien los criterios expuestos en la tabla 4.12 sirven como elementos de filtrado para ayudar al tomador de decisiones a saber donde actuar, una vez integrados en un sistema de información geográfica será posible tener una herramienta no solo que indique las zonas con mayor severidad del clima urbano sino que se dispondrá de una herramienta integral para la ordenación y planeamiento urbanos.

4.8 Exploración puntual de las variables descriptivas del efecto ICU.

Si realizamos la hipótesis de que tenemos condiciones climatológicas estables en las que la temperatura exterior se equipara con la temperatura PET. Se puede asumir que llevar a cabo acciones de rehabilitación cambiará positivamente el Mapa Analítico del Clima Urbano y en consecuencia el Mapa de Recomendación del Clima Urbano.

Por ejemplo, en el barrio Las Fuentes y la parte baja del barrio San José, es notoria la alta intensidad de la ICU (Figura 4.18). De ahí que es posible mediante la exploración de las distintas capas raster (Patrón TST, Sección 4.3.1.1; Verdor, Sección 4.3.1.2; Compacidad urbana 4.3.1.3; Pendiente topográfica, Sección 4.3.1.4; Distancia a río, Sección 4.3.1.5), reconocer las carencias del barrio y proponer medidas de mitigación de la ICU. Un posible plan de actuación del barrio sería la mejora de las cubiertas de los edificios y el aumento de la vegetación urbana. En consecuencia un futuro Mapa Analítico del Clima Urbano mejorará la nota de ICU “Extrema” a una ICU “Moderada”. De la misma manera un futuro Mapa de Recomendación del Clima Urbano asignará una nota positiva al recomendar “Preservar” en sustitución de la recomendación actual “Proceder” (Tabla 141124).

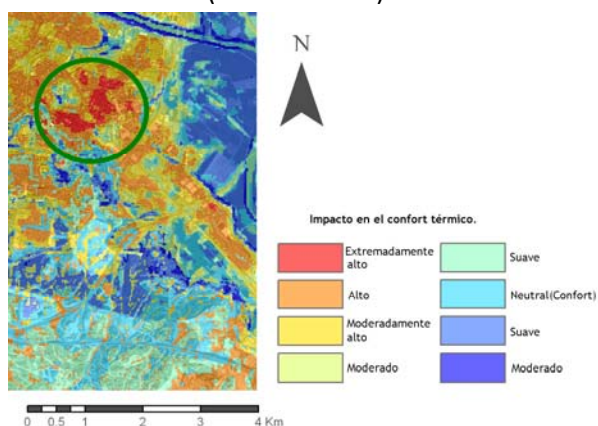


Figura 4.18 Detalle de la clasificación del impacto en el confort térmico: barrios Las Fuentes y San José.

<i>Variable.</i>	<i>Factor de impacto antes de rehabilitación.</i>	<i>Factor de impacto después de rehabilitación.</i>
Patrón TST.	1	3
Verdor.	0	2
Compacidad urbana.	0	0
Pendiente topográfica.	0	0
Distancia a río.	0	0
Mapa Analítico del Clima Urbano.	<i>Extremo</i>	<i>Moderado</i>
Mapa de Recomendación del Clima Urbano.	<i>Proceder</i>	<i>Preservar</i>

Tabla 4.13 Factor de impacto de las variables descriptivas del efecto ICU antes y después de llevar un plan de rehabilitación urbana.

Es importante mencionar que de las cinco variables que describen el Mapa Analítico del Clima Urbano (Ecuación 4.4), en caso de rehabilitación urbana solo será posible modificar las variables TST y verdor. Por una parte mejorar las propiedades superficiales de los materiales reducirá la TST y en consecuencia el efecto ICU. Por otra parte, en algunos casos, será posible aumentar la vegetación en el entorno urbano. Las variables compacidad urbana, pendiente topográfica y distancia a ríos no son modificables, de ahí que se puede concluir la importancia de la planificación urbana previa. Puesto que si es posible proyectar una parcelación de edificios con una baja compacidad y aprovechar las propiedades del terreno para favorecer la ventilación.

4.9 Relación entre demanda de energía y el efecto ICU.

Una vez modelado el Mapa Analítico del Clima Urbano y el Mapa de Recomendación Urbana, es interesante establecer la directa relación existente entre la demanda de energía de los edificios con la ICU. Sobre todo porque en aquellas zonas donde se presenta una alta intensidad de ICU será conveniente llevar alguna actuación urbana no sólo para lograr una mitigación del clima urbano sino también para lograr una reducción en la demanda de energía en los edificios al facilitar un confort con menos exigencias energéticas.

En particular será analizado el barrio de Valdespartera. Este barrio forma parte del proyecto europeo CONCERTO RENAISSANCE y es posible aprovechar los resultados positivos que se han generado a lo largo del proyecto. Uno de los principales objetivos del mismo fue demostrar que existe un ahorro de energía en edificios si son construidos con criterios bioclimáticos y han sido proyectados con una adecuada planificación urbana (Turégano et al., 2013). Para ello es importante tener en cuenta dos consideraciones: en primer lugar, el comportamiento humano está directamente relacionado con la eficiencia energética de los edificios bioclimáticos. En segundo lugar, la modificación en la temperatura del aire varía en función del entorno urbano y produce efectos directos sobre la demanda de energía de los edificios. En este

sentido, nos centraremos únicamente en las variaciones de demanda de energía de las viviendas debido al clima urbano.

Para llevar a cabo el análisis de comparación entre la demanda de energía de vivienda típica de Valdespartera con el clima urbano, se han utilizado los datos aportados del proyecto CONCERTO RENAISSANCE. Es importante mencionar que los datos aportados por el proyecto son producto de realizar una serie de consideraciones previas. Esto es así para ser objetivos en la evaluación de la demanda de energía. Para ello se ha supuesto que la vivienda típica del barrio de Valdespartera cumple con las condiciones mínimas establecidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) y las recomendaciones aportadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). Las principales consideraciones que se han realizado son las siguientes:

- Cubierta aislada térmicamente ($U=0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Cerramientos aislados térmicamente ($U=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Superficie de la vivienda igual a 80 m^2 .
- Temperatura de confort interior igual a 26°C en verano y 20°C en invierno.

Teniendo en cuenta que el microclima urbano juega un papel decisivo en la demanda de energía de la vivienda se ha simulado su comportamiento energético con el programa de simulación Energy Plus. Se han realizado tres simulaciones para la misma vivienda. La primera utiliza los datos climáticos del monolito 101, la segunda utiliza los datos climáticos del monolito 102 y la última simulación utiliza un fichero de datos climáticos que compila el promedio de 30 años de temperaturas registradas por el aeropuerto de Zaragoza. (Sanginés et al., 2012).

En la figura 4.19 se muestra cómo en el mes de agosto se incrementan los grados día de refrigeración y en consecuencia la demanda de energía evaluando el comportamiento de la vivienda con su adecuada evaluación del clima urbano. Por otra parte en invierno el incremento de la ICU refleja una menor demanda de energía (Figura 4.20).

La evaluación y simulación energética de un gran número de viviendas en Valdespartera permiten concluir que existe un aumento de la demanda de energía de refrigeración conforme incrementa la diferencia entre la temperatura interior de las viviendas y la temperatura exterior. En la figura 4.21 se muestra el porcentaje de incremento en la demanda de energía de refrigeración conforme incrementa la intensidad de la ICU, teniendo como referencia los resultados de la simulación del Monolito 101 (Demanda de refrigeración= 11.0 kWh/m^2 ; Temperatura interior = 26°C).

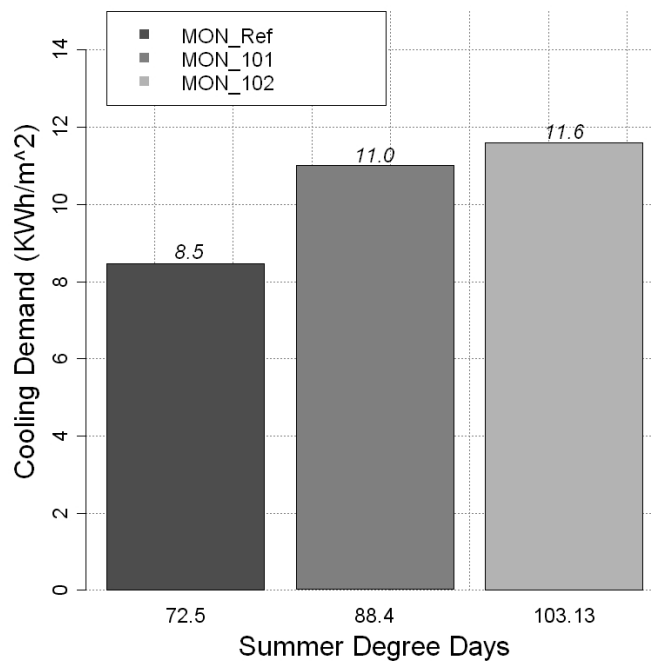


Figura 4.19 Demanda de refrigeración del mes de agosto para la misma vivienda con tres escenarios de clima urbano (Sanginés et al, 2012).

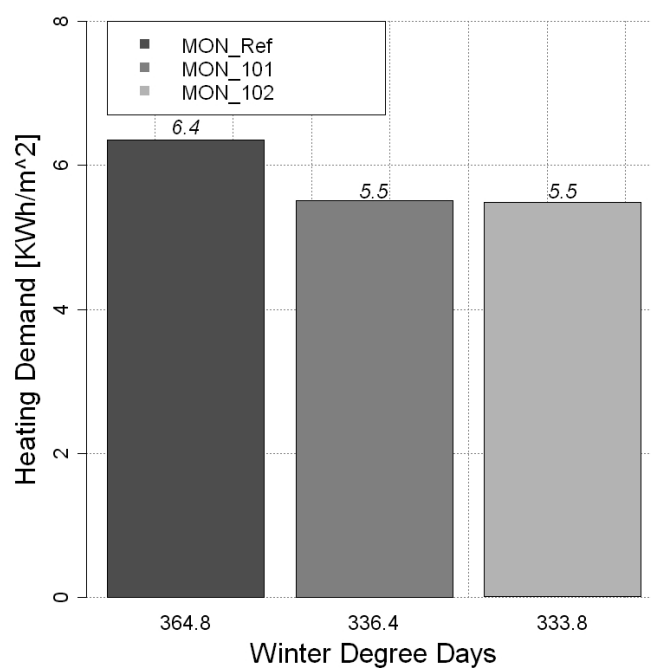


Figura 4.20 Demanda de calefacción del mes de diciembre para la misma vivienda con tres escenarios de clima urbano. (Sangines et al, 2012).

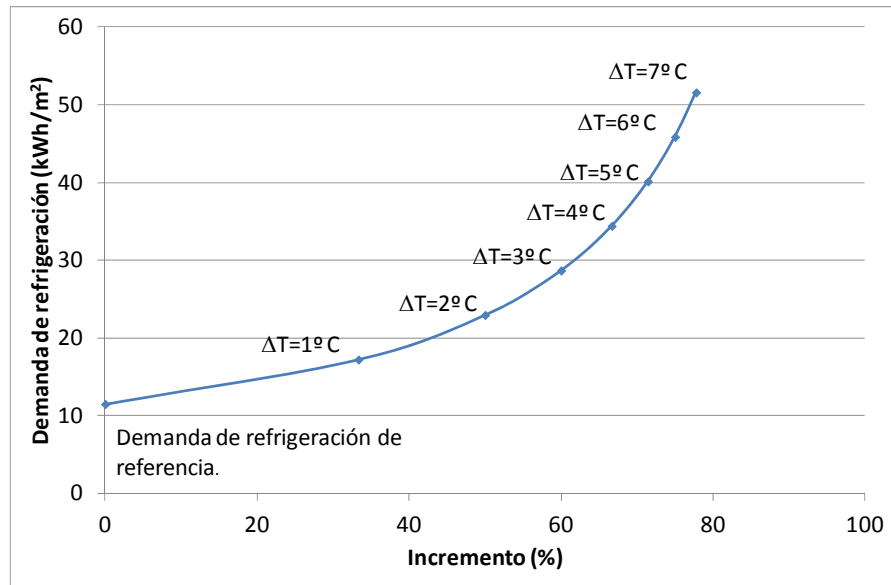


Figura 4.21 Diversos escenarios de demanda de refrigeración del mes de agosto de acuerdo a la variación de la ICU. (Turégano et al., 2013).

Caso contrario ocurre con la demanda de calefacción donde se aprecia una disminución mínima en la demanda de calefacción por cada grado de aumento por el efecto ICU (1-2 kWh/m² por cada 1°C). En la figura 4.22 se muestra el porcentaje de decremento en la demanda de energía de calefacción conforme incrementa la intensidad de la ICU, teniendo como referencia los resultados de la simulación del Monolito 101 (Demanda de calefacción= 5.5 kWh/m²; Temperatura interior =20°C). Aunque aparentemente la ICU favorece la demanda de calefacción es conveniente mencionar que en el periodo invernal se tiene un gran número de días con condiciones climáticas adversas por lo que no es preferible de fiarse de modelos computacionales que no consideren este tipo de condiciones (Turégano et al., 2012).

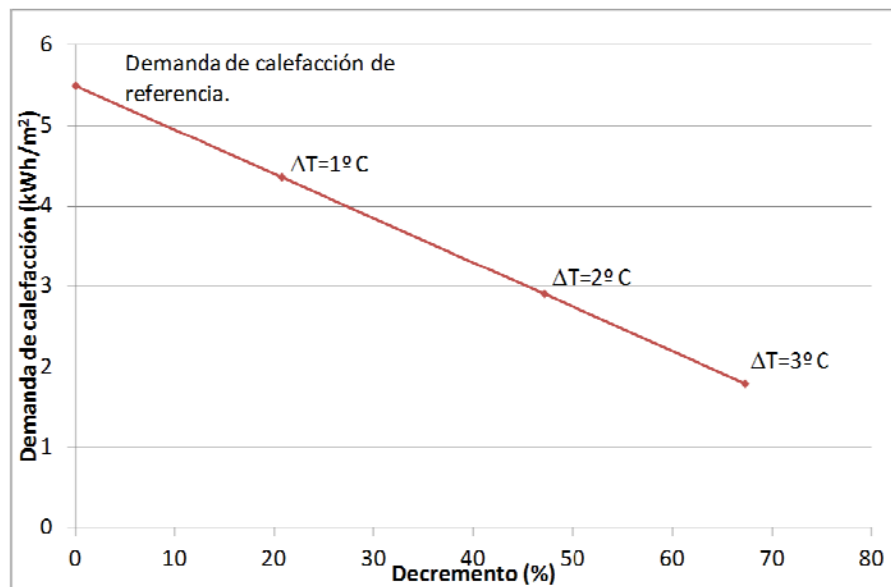


Figura 4.22 Diversos escenarios de demanda de calefacción del mes de enero de acuerdo a la variación de la ICU (Turégano et al., 2013).

4.10 Alternativas de mitigación del clima urbano

Si bien se ha reconocido la posibilidad de determinar zonas de actuación en base a los criterios y posibilidades del tomador de decisiones, seguidamente será necesario proponer alternativas de mitigación del clima urbano. En el capítulo 2 se han mencionado distintas formas de mitigar el clima urbano, estas se resumen como:

4.10.1 Materiales adecuados en el entorno urbano y en la edificación.

Las propiedades de los materiales están asociadas con su correspondiente comportamiento térmico. Razón por la cual es preferible utilizar materiales con alta reflectividad reduciendo la cantidad de radiación solar absorbida a través de las superficies urbanas.

El albedo de una superficie está definido como la reflectividad de un material asociado con una longitud de onda. Los materiales usados en las fachadas de los edificios y los pavimentos de las calles absorben y reflejan radiación solar dependiendo del albedo. El uso de materiales con alto albedo reduce la cantidad de radiación solar absorbida a través de la envolvente del edificio y las estructuras superficiales se mantienen frescas.

De igual manera, los materiales emiten radiación de onda larga (infrarroja) en función de la temperatura superficial y de la emisividad. En este sentido los materiales con alta emisividad liberan más fácilmente la energía que ha sido absorbida por la radiación solar.

4.10.2 Zonas verdes en el entorno urbano.

La utilización de vegetación en espacios urbanos disminuye la intensidad del clima urbano, estabiliza e incluso incrementa la recarga acuífera y emite oxígeno a la atmosfera como resultado de la fotosíntesis. Asimismo, los árboles de hoja caduca proveen protección solar a los edificios durante verano y permiten captación solar en invierno; De manera general, la vegetación previene la erosión.

4.10.3 Reducción calor antropogénico.

La mitigación del efecto de la isla de calor asociada al calor antropogénico está relacionada con los sectores residencial, terciario, industrial y transporte. En el sector residencial existe la posibilidad de remplazar equipos de aire acondicionado obsoletos, ya que no solo se reduce el calor producido por los condensadores que se encuentran ubicados en el exterior de los edificios sino que también se mejora la eficiencia energética de las viviendas. Con respecto al sector terciario es necesario recomendar medidas de actuación en caso de existir derroche energético. En cuanto a las estrategias de mitigación del efecto ICU por fuentes industriales es indispensable una ordenación territorial de las zonas industriales y fomentar un marco legal más estricto en cuanto al control de emisiones a la atmosfera (NO_x, O₃, CO₂, SO₂). En cuanto al sector transporte el calor antropogénico se puede reducir con acciones relacionadas con el fomento y optimización del transporte público, con la

ordenación de vías urbanas y la construcción de vías ciclistas, endureciendo el marco legal en cuanto al control de emisiones emitidas a la atmosfera.

4.10.4 Planeamiento urbano.

El estudiar variables relacionadas con la forma y el espacio urbano permite determinar que el planeamiento de las ciudades, expresada en las proporciones geométricas de sus calles y de sus edificios, influyen en la determinación las características térmicas urbanas. En términos generales una alta densidad urbana tiende a reducir la penetración solar siendo un obstáculo de radiación de onda corta incidente además de resultar en una “trampa” de radiación de onda larga, pues la radiación incidente en los edificios posteriormente se liberará como calor.

Los aspectos a ser considerados en un planteamiento urbano para mitigar el efecto de ICU de acuerdo a su escala espacial se muestran en la tabla 4.14:

<i>Mesoescala (Entorno urbano)</i>	<i>Microescala (Manzanas y calles)</i>
Introducción de vegetación y superficies de agua.	Mejorar el diseño de calles considerando la relación Altura edificios-Anchura de calles (Sky View Factor) y el sombreado de los edificios.
Reducción del calor antropogénico (industria, edificios y trafico).	Mejorar la ventilación de las calles orientando correctamente las calles (Efecto cañón urbano)
Uso apropiado de la ventilación aprovechando los vientos y las características topográficas de cada región.	Introducir vegetación en el entorno urbano. Decremento del albedo en superficies urbanas.

Tabla 4.14 Principales mediadas de mitigación efecto ICU.

Es importante mencionar que estas estrategias deben ser tratadas con cautela y deben ser evaluadas antes de ser implementadas. En un adecuado planteamiento urbano las decisiones y medidas adoptadas deben mejorar el clima urbano sin causar un efecto negativo. Especialmente hay acciones que mejoran el comportamiento térmico urbano que pueden repercutir negativamente en la calidad del aire, por ejemplo, el uso de vegetación dentro de cañones urbanos puede reducir la dispersión de elementos contaminantes.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

5.1 Síntesis.

En la presente tesis doctoral se ha desarrollado una metodología que permite identificar el fenómeno de Isla de Calor Urbana superando las barreras que limitan su evaluación: analizar y ponderar en su conjunto las variables que la causan. Esta metodología se ha basado en la hipótesis de que es posible estimar la Isla de Calor Urbana mediante el estudio del entorno urbano. Para llegar a ello, se han utilizado imágenes de teledetección, sistemas de información geográfica y medidas experimentales.

Como se ha visto a lo largo de esta tesis doctoral, el incremento de la temperatura del aire debido a la modificación del suelo impacta directamente en el confort y calidad de vida de los habitantes e impacta directamente en el consumo de sistemas de aire acondicionado de los edificios. Por lo que tanto, la herramienta metodológica que se ha desarrollado facilita la comprensión y evaluación de la Isla de Calor Urbana y esgrime un argumento contundente a la hora de llevar a cabo un planeamiento urbano sostenible.

El presente documento consta de cinco capítulos. A continuación se revisa brevemente el contenido de cada uno:

El capítulo 1 presenta los principales objetivos de la tesis doctoral e hizo énfasis en la falta de un proyecto urbano sostenible en las ciudades actuales.

El capítulo 2 establece el marco conceptual de la Isla de Calor Urbana, se ha puesto especial detalle en la recopilación de publicaciones asociadas a los conceptos de generación, determinación y mitigación del fenómeno.

Con respecto a la generación de la Isla de Calor Urbana se ha reflejado el impacto de una gran diversidad de variables en el cambio del clima urbano.

En lo relativo a la determinación de la ICU, se han referido los distintos modelos existentes para evaluar el cambio de temperatura debido al entorno urbano. Estos modelos pueden ser clasificados como: Modelos analíticos, que evalúan el fenómeno desde un enfoque físico llevando a cabo un exhaustivo balance de energía; Modelos numéricos, son modelos que realizan una interpolación de resultados en base a estudios previos; y el Modelado de Mapas de Clima Urbano, que analizan el clima urbano en base a una compilación y evaluación de las principales variables que la causan.

Por último, se presentan planteamientos de mitigación del clima urbano propuestos por diversos autores.

El capítulo 3 aborda la extracción de una serie de variables físicas y variables geoespaciales para la ciudad. Habiéndose establecido una serie de condiciones necesarias para llevar a cabo el análisis de datos en su conjunto (área de estudio, proyección, resolución de celda, dimensionado espacial).

La selección del área de estudio ha tenido en cuenta que la ciudad de Zaragoza es un escenario con contrastes climáticos entre invierno y verano, además de estar fuertemente influenciada por el potencial dinámico del viento.

Seguidamente se ha abordado la utilización de imágenes de teledetección como herramienta de extracción de variables físicas que influyen directamente en el efecto ICU. En concreto se ha puesto especial énfasis en la Temperatura Superficial Terrestre (TST) y en la evaluación de la vegetación urbana. Por último se ha extraído información vectorial del entorno urbano mediante sistemas de información geográfica para su posterior transformación a información tipo raster.

El capítulo 4 aprovecha las variables que describen el clima urbano para formular una metodología adecuada para modelar un Mapa Analítico del Clima Urbano. La serie de pasos para realizar el modelado comienza eliminando en primer lugar la información redundante mediante el Análisis por Conglomerados y seguidamente ponderando la carga factorial de las variables que describen el efecto ICU mediante un Proceso de Análisis Jerárquico. La comprobación del Mapa Analítico del Clima urbano con medidas experimentales ha permitido realizar un proceso de calibración y optimización del modelo. En este sentido, el poco número de estaciones meteorológicas que se han podido utilizar en este proyecto implica una cierta limitación en la validación al no poderle asignar suficiente significación estadística.

Asimismo se ha evaluado el impacto en la ICU en la demanda energética de los edificios. Advirtiéndose que en verano se puede producir un aumento significativo de la demanda de refrigeración en casos de presentarse una alta intensidad de la ICU. Por otra parte en invierno el efecto ICU es menos significativo en la demanda de calefacción de los edificios.

En la parte final de este capítulo se ha desarrollado una metodología, fácilmente generalizable a otras áreas, para localizar las zonas más susceptibles al clima urbano utilizando los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para tomar decisiones.

5.2 Contribuciones.

A continuación se enumeran los aportes que ha generado esta tesis doctoral:

En el capítulo segundo se incluye una recopilación actualizada de las publicaciones especializadas en clima urbano, con especial atención al marco teórico y a los conceptos generación, determinación y mitigación de la Isla de Calor Urbana.

En el mismo capítulo segundo se ha mostrado la diferencia entre el estudio del clima urbano a micro-escala y meso-escala para la ciudad de Zaragoza: por una parte se ha recogido un estudio CFD del barrio de Valdespartera para mostrar el cálculo de la velocidad del viento a micro-escala y por otra se muestran los patrones del viento cuando se realiza un estudio a meso-escala.

En el capítulo tercero, se han extraído variables físicas y geoespaciales para el estudio del fenómeno de isla de calor urbana mediante sondas meteorológicas, imágenes satelitales, y sistemas de información geográfica.

Con respecto a la extracción de datos experimentales se ha realizado una base de datos horaria de temperatura del aire de las seis estaciones meteorológicas utilizadas. Consecuentemente se ha evaluado el clima urbano de Zaragoza los días y noches típicas de verano y posteriormente los días y noches típicas de invierno. El registro horario de temperaturas ha permitido no solo la evaluación del clima urbano sino también la elaboración de ficheros climáticos para poder ser utilizados por programas de simulación energética de edificios. En este sentido, y de acuerdo con el conocimiento adquirido a lo largo de esta tesis doctoral, se expone que para simular la demanda de energía de un edificio es necesario utilizar un fichero de datos adecuado con el clima urbano, en lugar de un fichero climático que no contempla el entorno urbano.

Con respecto la utilización de imágenes satelitales, por una parte se ha determinado la temperatura superficial terrestre en cubiertas urbanas con sumo detalle. Además se ha propuesto el Análisis de Componentes Principales como herramienta para evaluar patrones temporales de temperaturas superficiales. Por otra parte, se ha evaluado el índice de verdor más adecuado para el entorno urbano, comparando entre el Análisis de Componentes Principales multivariante y el índice Tasseled Cap.

En lo relativo a la información extraída mediante Sistemas de Información Geográfica merece destacarse la elaboración de la capa raster de "compacidad urbana", pues se ha propuesto una metodología para determinar la densidad de la edificación aplicando conceptos geométricos.

Por último, se ha aplicado el modelo TVX sobre el entorno urbano. Si bien el modelo TVX ha sido ampliamente utilizado en grandes superficies, en menor medida ha sido utilizado en superficies urbanas.

En el capítulo cuarto, se ha propuesto elaborar un Mapa Analítico del Clima Urbano mediante la aplicación de una metodología que utiliza dos métodos estadísticos: el Análisis por Conglomerados y el Proceso Analítico Jerárquico.

En primer lugar se ha aplicado el Análisis por Conglomerados como método de sustracción de información redundante, aprovechando de esta manera las variables físicas y las variables geoespaciales realmente significativas para describir en su

conjunto el efecto de la isla de calor. En este sentido se ha sugerido el método WARD como procedimiento para realizar la asociación de las distintas variables analizadas en el contexto del estudio del clima urbano.

Seguidamente, se ha formulado llevar a cabo el Proceso Analítico Jerárquico como método de obtención de la carga factorial de cada una de las variables que describen el efecto ICU.

Asimismo, se ha propuesto una ecuación que describe el mapa del clima urbano integrando el Análisis de Conglomerados y el Proceso Analítico Jerárquico. Igualmente se ha planteado un método de calibración y validación del modelo mediante un proceso reiterativo de cálculo de cargas factorial hasta que el Mapa Analítico del Clima Urbano sea coherente con las medidas experimentales.

Si bien estos métodos estadísticos han sido ampliamente utilizados en las ciencias sociales, en menor medida han sido utilizados en estudios de evaluación geoespacial del entorno urbano, en concreto, con información tipo raster.

En la última parte del capítulo cuarto, relativa a la elaboración del Mapa de Recomendación Urbana mediante la clasificación de tres escenarios de actuación: mantener, vigilar, proceder. Se ha sugerido que localizar los posibles lugares de actuación de mitigación del clima urbano también depende de la evaluación de una serie de factores sociales y económicos.

Finalmente en la sección de Anexos, se presenta el conjunto de *scripts* generados a lo largo de esta tesis doctoral. Si bien la metodología propuesta en esta tesis doctoral se puede llevar a cabo con cualquier herramienta estadística especializada, en concreto en esta tesis se ha utilizado el programa R, programa estadístico de distribución gratuita.

5.3 Perspectivas.

A lo largo de esta tesis doctoral se ha propuesto una metodología capaz de describir el clima urbano mediante el uso de datos experimentales, técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica. La mejora cualitativa y cuantitativa de los métodos aplicados sobre estos tres pilares provocará ineludiblemente en los resultados obtenidos.

En lo relativo al uso de datos experimentales, es evidente que es necesario acrecentar el número de sondas de temperatura sobre la ciudad para proporcionar el suficiente rigor estadístico para la validación de los Mapas Analíticos del Clima Urbano generados. En este sentido, el mapa que ya ha sido generado y validado con las seis estaciones meteorológicas sirve como referencia para indicar donde instalar las futuras sondas, siendo el primer criterio para instalar las futuras sondas de temperatura su ubicación sobre distintas cubiertas urbanas y vegetales. En concreto, es prioritario ubicar sondas de temperatura en parques y jardines, ya que este tipo de cubierta vegetal sirve como referencia del índice PET, es decir establece la zona de confort térmico.

Un segundo método para mejorar la validación del Mapa Analítico del Clima Urbano, y que complementa al aumento de sondas de temperatura, puede ser enfocado desde un aspecto sociológico. Esto es, realizar un número significativo de encuestas de confort a los transeúntes. Esperando que los peatones que se encuentran dentro de parques y jardines denoten una sensación de confort térmico en comparación con la sensación térmica en otro tipo de cubiertas urbanas.

En cuanto a la utilización de imágenes con técnicas de teledetección, la utilización de radiometría de campo en condiciones controladas puede jugar un papel importante para verificar las relaciones biofísicas de la vegetación urbana. Esta cuestión puede ser abordada directamente sobre los datos de reflectividad del espectro continuo proporcionados por el radiómetro.

Continuando con las perspectivas del uso de imágenes de teledetección, es importante mencionar que LANDSAT TM (LANDSAT 5) ha tenido éxito extraordinario, ofreciendo contribuciones sin precedentes a lo largo de 29 años, sin embargo ha dejado de operar a finales de Noviembre del 2011. Respecto a LANDSAT ETM+ (LANDSAT 7) el fallo que tiene en sus sensores lo hace un satélite limitado y que depende intrínsecamente de modelos de interpolación para completar la información que es incapaz de mostrar. Afortunadamente a principios de febrero del 2013 ha sido enviado al espacio el satélite LANDSAT LDCM (LANDSAT 8). Este satélite tiene un amplio alcance espectral, en concreto tiene dos bandas de datos en el espectro térmico con una resolución de 30 metros, por lo que permitirá aplicar nuevas técnicas para obtener información de temperatura, evapotranspiración y estado hídrico de los vegetales. Para el estudio del clima urbano, utilizar las imágenes generadas por LANDSAT LDCM es un paso hacia adelante ya que se mejora en resolución en la banda térmica, además de que es posible aplicar el método Split-Window para determinar la temperatura superficial terrestre. Por último es importante recordar que el U.S. Geological Survey (USGS) ofrece de manera gratuita y libre las imágenes generadas por LANDSAT TM, LANDSAT ETM, Y LANDSAT LDCM, a la comunidad investigadora mundial.

Así mismo, la integración de nuevas variables en Sistemas de Información Geográfica permitirá a los tomadores de decisiones saber dónde y cómo actuar. En este sentido es de gran interés el desarrollo de capas de información que evalúen: el consumo de energía de edificios y el calor antropogénico emitido por los sectores residencial, terciario, industrial, así como la evaluación del tráfico de la ciudad. Para ello es indispensable un trabajo multidisciplinar que permita reflexionar a los políticos, ingenieros, arquitectos, urbanistas y tomadores de decisiones sobre las problemáticas urbanas existentes y de lo imperativo que es encontrar soluciones que reduzcan la dependencia energética teniendo en cuenta la satisfacción de los habitantes.

Finalmente, una futura línea de investigación en el análisis del clima urbano es la integración de información cuantitativa del viento en una capa tipo raster mediante un análisis detallado CFD (Computer Fluid Dynamics). Si bien, a lo largo de esta tesis se evaluó el potencial dinámico del viento de manera cualitativa, este no se ha cuantificado en un nivel a meso-escala. La principal razón de no llevar a cabo el análisis CFD reside en que al día de hoy no existe la capacidad computacional para introducir una ciudad completa con su respectiva introducción de cargas térmicas, sin embargo en un futuro no muy lejano existirá esta posibilidad.

ANEXOS

5.1 Script ERDAS para generar imágenes de TST.

```
COMMENT "Generated from graphical model:
e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/modelo_completo.g
md";
SET CELLSIZE MIN;
# set window for the model
SET WINDOW INTERSECTION;
# set area of interest for the model
SET AOI NONE;
# declarations
Integer RASTER n1_layerstack_179_subset FILE OLD NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/imagen_landsat/179_2011/laye
rstack_179_subset.img";
Float RASTER n18_radiancia_179_2011 FILE NEW IGNORE 0 ATHEMATIC FLOAT
SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/radiancia_179_201
1.img";
Float RASTER n50_mde_area FILE OLD NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"e:/landsat_tm/mde/mde_area.img";
Float RASTER n52_temp;
Float RASTER n77_reflectividad_179_2011 FILE NEW USEALL ATHEMATIC FLOAT
SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/reflectividad_179_
2011.img";
Float RASTER n97_vegetation_cover_179_2011 FILE NEW USEALL ATHEMATIC FLOAT
SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/vegetation_cover_
179_2011.img";
Integer RASTER n113_layerstack_179_t_subset FILE OLD NEAREST NEIGHBOR AOI
NONE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/imagen_landsat/179_2011/laye
rstack_179_t_subset.img";
Float RASTER n123_tst_179_2011_1 FILE NEW IGNORE 0 ATHEMATIC FLOAT SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/tst_179_2011_1.im
g";
Float RASTER n128_emisividad_termico_179_2011 FILE NEW USEALL ATHEMATIC
FLOAT SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/emisividad_termic
o_179_2011.img";
Float RASTER n132_ndvi_179_2011 FILE NEW USEALL ATHEMATIC FLOAT SINGLE
"e:/landsat_tm/estacional/lt51990312011179mps00/modelo_tst/ndvi_179_2011.im
g";
INTEGER TABLE n2_Custom_Integer [6];
FLOAT TABLE n10_Output;
FLOAT TABLE n13_Output;
FLOAT TABLE n30_Custom_Float [6];
```

```

FLOAT TABLE n39_Output;
FLOAT TABLE n75_Custom_Float [6];
INTEGER SCALAR n24_Integer;
INTEGER SCALAR n25_Integer;
FLOAT SCALAR n29_Float;
FLOAT SCALAR n33_Float;
FLOAT SCALAR n36_Float;
FLOAT SCALAR n45_Float;
FLOAT SCALAR n46_Float;
FLOAT SCALAR n85_Float;
FLOAT SCALAR n89_Float;
FLOAT SCALAR n93_Float;
FLOAT SCALAR n94_Float;
FLOAT SCALAR n95_Float;
FLOAT SCALAR n96_Float;
FLOAT SCALAR n99_Float;
FLOAT SCALAR n103_Float;
FLOAT SCALAR n104_Float;
FLOAT SCALAR n109_Float;
FLOAT SCALAR n110_Float;
FLOAT SCALAR n118_Float;
FLOAT SCALAR n119_Float;
FLOAT SCALAR n127_Float;
# load table n2_Custom_Integer
n2_Custom_Integer = TABLE(75, 32, 28, 20, 14, 7);
# load scalar n24_Integer
n24_Integer = 179;
# load scalar n25_Integer
n25_Integer = 365;
# load scalar n29_Float
n29_Float = 0;
# load table n30_Custom_Float
n30_Custom_Float = TABLE(1957, 1826, 1554, 1036, 215, 80.67);
# load scalar n33_Float
n33_Float = 63.337545;
# load scalar n36_Float
n36_Float = 0;
# load scalar n45_Float
n45_Float = 63.337545;
# load scalar n46_Float
n46_Float = 126.693316;
# load table n75_Custom_Float
n75_Custom_Float = TABLE(0.21, 0.29, 0.44, 0.46, 0.53, 0.95);
# load scalar n85_Float
n85_Float = 1;
# load scalar n89_Float
n89_Float = 8.8726;
# load scalar n93_Float
n93_Float = 0.102;
# load scalar n94_Float
```

```

n94_Float = 0.9041;
# load scalar n95_Float
n95_Float = 0.978;
# load scalar n96_Float
n96_Float = 0.914;
# load scalar n99_Float
n99_Float = 0;
# load scalar n103_Float
n103_Float = 0.101;
# load scalar n104_Float
n104_Float = 0.877;
# load scalar n109_Float
n109_Float = 1.182425197;
# load scalar n110_Float
n110_Float = 0.055374803;
# load scalar n118_Float
n118_Float = 607.76;
# load scalar n119_Float
n119_Float = 1260.56;
# load scalar n127_Float
#n127_Float = 2.718281828459045;
# function definitions
#define n112_memory Float($n113_layerstack_179_t_subset)
#define n106_memory Float($n109_Float + ( $n110_Float * $n112_memory ))
#define n126_memory Float(EITHER 0 IF ( $n106_memory < 0 ) OR $n106_memory
OTHERWISE )
#define n125_memory Float($n126_memory)
#define n54_memory Float(ASPECT ( $n50_mde_area ))
n52_temp = DEGREE SLOPE ( $n50_mde_area , "meters" );
#define n73_memory Float(COS ( $n52_temp * 0.01745 ))
#define n59_memory Float(COS ( ( 90 - $n45_Float ) * 0.01745 ) * COS ( $n52_temp
* 0.01745 ) + \
SIN ( ( 90 - $n45_Float ) * 0.01745 ) * SIN ( $n52_temp * 0.01745 ) * \
COS ( ( $n46_Float - $n54_memory ) * 0.01745 ))
n39_Output = TABLE ( 6 : 0.70 , 0.78 , 0.85 , 0.91 , 0.95 , 0.97 );
n36_Float = COS ( ( 90 - $n33_Float ) * 0.01745 );
n29_Float = ( 1 + 0.01674 * ( SIN ( 2 * PI * ( $n24_Integer - 93.5 ) / $n25_Integer ) )
** 2;
n13_Output = TABLE ( 6 : 0.765826772 , 1.448188976 , 1.043976378 ,
0.876023622 , 0.120354331 , 0.065551181 );
n10_Output = TABLE ( 6 : -2.285826772 , -4.288188976 , -2.213976378 , -
2.386023622 , -0.490354331 , -0.215551181 );
#define n4_memory Float($n1_layerstack_179_subset - $n2_Custom_Integer)
#define n16_memory Float($n10_Output + ( $n13_Output * $n4_memory ))
n18_radiancia_179_2011 = EITHER 0 IF ( $n16_memory < 0 ) OR $n16_memory
OTHERWISE ;
#define n41_memory Float(( $n29_Float * PI * $n18_radiancia_179_2011 ) / (
$n30_Custom_Float * $n36_Float * $n39_Output ))

```

```
#define n43_memory Float(EITHER 0 IF ( $n41_memory < 0 ) OR $n41_memory
OTHERWISE )
#define n62_memory Float(( $n43_memory * $n73_memory ) / \
( ( $n59_memory ** $n75_Custom_Float ) * ( $n73_memory ** $n75_Custom_Float
) ) )
#define n64_memory Float(EITHER 0 IF ( $n62_memory < 0 ) OR $n62_memory
OTHERWISE )
#define n67_memory Float(EITHER 1 IF ( $n64_memory > 1 ) OR $n64_memory
OTHERWISE )
n77_reflectividad_179_2011 = $n67_memory * 100;
#define n81_memory Float($n77_reflectividad_179_2011(4) +
$n77_reflectividad_179_2011(3))
#define n80_memory Float($n77_reflectividad_179_2011(4) -
$n77_reflectividad_179_2011(3))
n132_ndvi_179_2011 = EITHER 0 IF ( $n81_memory == 0.0 ) OR $n80_memory /
$n81_memory OTHERWISE;
#define n90_memory Float(($n85_Float - ($n132_ndvi_179_2011 / $n93_Float ) ) -
($n89_Float * ($n85_Float - ($n132_ndvi_179_2011 / $n94_Float ) ) ) )
#define n87_memory Float($n85_Float - ($n132_ndvi_179_2011 / $n93_Float ) )
n97_vegetation_cover_179_2011 = $n87_memory / $n90_memory;
#define n100_memory Float(($n97_vegetation_cover_179_2011 * $n95_Float) +
($n96_Float * (1 - $n97_vegetation_cover_179_2011))+ $n99_Float)
n128_emisividad_termico_179_2011 = ($n103_Float * $n100_memory) +
$n104_Float;
#define n120_memory Float($n119_Float / (LOG ((
($n128_emisividad_termico_179_2011 * $n118_Float / $n125_memory) + 1 ) ) ) )
n123_tst_179_2011_1 = EITHER 0 IF ( $n120_memory < 0 ) OR $n120_memory
OTHERWISE ;
QUIT;
```

5.2 Script R para generar ACP multitemporal TST.

```
par(mfrow=c(1,1),mar=c(5,5,1.5,3))
# '212', '237', '260' , '173','253', '144', '192', '199', '099', '131','179', '250')
# tst_199_2010(SpatialPointsDataFrame)
tst_199_2010_grid <-
readAsciiGrid('./estacional/LT52000312010199MPS01/modelo_tst/tst_199_2010.asc'
,
dec=',', colname='Día_199_2010')
r_islaIndepPt_tst_199_2010<-rasterFromXYZ(tst_199_2010_grid, res=c(25,25),
crs=NA, digits=5)
tst_173_2009_grid <-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312009173MPS00/modelo_tst/173_2009.asc',
dec=',', colname='Día_173_2009')
tst_253_2009_grid <- readAsciiGrid
('./estacional/LT51990312009253MPS00/modelo_tst/253_2009.asc',
dec=',', colname='Día_253_2009')
tst_285_2009_grid <- readAsciiGrid
('./estacional/LT51990312009285MPS00/modelo_tst/tst_285_2009.asc',
dec=',', colname='Día_285_2009')
tst_144_2010_grid <- readAsciiGrid
('./estacional/LT51990312010144MPS00/modelo_tst/tst_144_2010.asc',
dec=',', colname='Día_144_2010')
tst_192_2010_grid <- readAsciiGrid
('./estacional/LT51990312010192MPS00/modelo_tst/tst_192_2010.asc',
dec=',', colname='Día_192_2010')
tst_215_2010_grid <- readAsciiGrid
('./estacional/LT52000312010215MPS00/modelo_tst/tst_215_2010.asc',
dec=',', colname='Día_215_2010')
tst_099_2011_grid <- readAsciiGrid (
 './estacional/LT51990312011099MPS00/modelo_tst/tst_099_2011.asc',
dec=',', colname='Día_099_2011')
tst_179_2011_grid <- readAsciiGrid (
 './estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/tst_179_2011.asc',
dec=',', colname='Día_179_2011')
tst_250_2011_grid <- readAsciiGrid (
 './estacional/LT52000312011250MPS00/modelo_tst/tst_250_2011.asc',
dec=',', colname='Día_250_2011')

#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\tst_051_2011.a
sc
tst_051_2011_grid <- readAsciiGrid (
 './estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/tst_051_2011.asc',
dec=',', colname='Día_051_2011')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT52000312011026MPS00\modelo_tst\tst_026_2011.a
sc
#tst_026_2011_grid <- readAsciiGrid (
 './estacional/LT52000312011026MPS00/modelo_tst/tst_026_20115.asc',
#dec=',', colname='Día_026_2011')
```

```

#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011131MPS00\modelo_tst\tst_131_2011.a
sc
tst_131_2011_grid <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011131MPS00\modelo_tst\tst_131_2011.asc',
dec=',', colname='Día_131_2011')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT52000312003260MTI01\modelo_tst\tst_260_2003.a
sc
tst_260_2003_grid <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT52000312003260MTI01\modelo_tst\tst_260_2003.asc',
dec=',', colname='Día_260_2003')
#E:\LANDSAT_TM\temporal\LT51990312003205MTI01\modelo_tst\tst_205_2003.as
c
tst_205_2003_grid <- readAsciiGrid (
'./temporal/LT51990312003205MTI01\modelo_tst\tst_205_2003.asc',
dec=',', colname='Día_205_2003')
#E:\LANDSAT_TM\temporal\LT51990312003237MTI01\modelo_tst\tst_237_2003.as
c
tst_237_2003_grid <- readAsciiGrid (
'./temporal/LT51990312003237MTI01\modelo_tst\tst_237_2003.asc',
dec=',', colname='Día_237_2003')
#E:\LANDSAT_TM\temporal\LT52000312003212MTI01\modelo_tst\tst_212_2003.as
c
tst_212_2003_grid <- readAsciiGrid (
'./temporal/LT52000312003212MTI01\modelo_tst\tst_212_2003.asc',
dec=',', colname='Día_212_2003')
#-----
#uNION DE TODOS LOS RASTER EN UNA MATRIZ
#-----
# '212', '237', '260' , '173', '253', '144', '192', '199', '099', '131', '179', '250')
islaGrid_TST<- cbind( tst_212_2003_grid, tst_237_2003_grid, tst_173_2009_grid,
tst_253_2009_grid, tst_192_2010_grid, tst_199_2010_grid, tst_099_2011_grid,
tst_131_2011_grid, tst_179_2011_grid, tst_250_2011_grid) #unir grid que hemos
cargado
islaIndepPt_TST <- as.data.frame(islaGrid_TST)
colnames(islaIndepPt_TST) <- c(names(islaIndepPt_TST)[1:10], 'x', 'y')
islaIndepPt_TST_ACP <- islaIndepPt_TST[c(1:10)] #Se usara en ACP
coordinates(islaIndepPt_TST) <- c('x', 'y')
summary(islaIndepPt_TST)
islaIndepPt_TST_ACP_matrix <- as.matrix(islaIndepPt_TST_ACP)
islaIndepPt_TST_ACP_matrix
par(mfrow=c(1,1), mar=c(8,4,4,4))
boxplot(islaIndepPt_TST_ACP, labels=TRUE,col="wheat", mar=c(2,2,2,2),
main='Resumen estadístico de las imágenes TST ', ylab='Temperatura [K]',
cex.main=1, las=2, cex.axis=1)
grid()
boxplot(islaIndepPt_TST_ACP$stats, plot=F)
#===== Análisis multivariante: ACP, agrupamiento, etc =====
#Análisis de componentes principales:
#se utiliza la matriz como "data.frame" (sin haber establecido las coordenadas)
#summary(islaIndepPt_TST)

```

```
#islaIndepPt_TST_ACP <- islaIndepPt[c(1:10)] #se quitan x y y concatenando las
columnas restantes
#summary(islaIndepPt_TST_ACP)
#-----
#Princomp sin estandarizar datos, cada valor es absoluto.
#-----
c<-princomp(islaIndepPt_TST_ACP, cor=FALSE, scores=TRUE) #matriz de correlacion
cada valor con peso abs
summary(c,loadings=TRUE)
summary(c,scores=TRUE)
c$loadings[,]#todos los valores, antes omitia valores pocos significativos
c$sdev
print(c)
var <- ((c$sdev*c$sdev)/10) #varianzas explicadas por cada componente (en %)
var
vara <- var #varianzas acumuladas:
for(i in 2:nv) vara[i] <- vara[i]+vara[i-1]
plot(1:nv,var,type="l",lwd=2,col="blue",ylim=c(0,100),xlab="Componentes",ylab="Va
rianza (%)",main="Varianza explicada") #Scree plot
lines(vara,lwd=2,col="blue")
abline(100/nv,0,col="red") #añadimos referencia varianzas iniciales
grid()
points(var)
points(vara)
#-----
#Princomp estandarizaNDO datos, cada valor es relativo
#-----
#Ahora si...
c<-princomp(islaIndepPt_TST_ACP, cor=TRUE, scores=TRUE) #matriz de
correlaciones, estandarizando datos, cada valor con peso relativo no abs
c$loadings[,]#todos los valores, antes omitia valores pocos significativos
load_matrix <- as.matrix (c$loadings)
load_matrix
summary(load_matrix)
load_matrix_sdev <- as.matrix (c$sdev)
load_matrix_sdev
summary(load_matrix_sdev)
multiplica_vv <- load_matrix %*% load_matrix_sdev
summary(multiplica_vv)
class(multiplica_vv)
multiplica_data_vv <- as.data.frame (multiplica_vv)
summary(multiplica_data_vv)
multiplica <- islaIndepPt_TST_ACP_matrix %*% load_matrix
summary(multiplica)
class(multiplica)
multiplica_data <- as.data.frame (multiplica)
summary(multiplica_data)
multiplica_data_ACP1 <- multiplica_data$Comp.1
summary(multiplica_data_ACP1)
```



```
ACP1_s <- cbind (multiplica_data_ACP1,s1,s2)
summary(ACP1_s)
ACP1_s_data <- as.data.frame(ACP1_s)
colnames(ACP1_s_data) <- c(names(ACP1_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP1_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP1_s <- rasterFromXYZ(ACP1_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP1_s)
levels <- seq(-819.5,-778.7,4.1)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYlBu')[1:10]
spplot(r_multiplica_data_ACP1_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='ACP1')
multiplica_data_ACP2 <- multiplica_data$Comp.2
summary(multiplica_data_ACP2)
ACP2_s <- cbind (multiplica_data_ACP2,s1,s2)
summary(ACP2_s)
ACP2_s_data <- as.data.frame(ACP2_s)
colnames(ACP2_s_data) <- c(names(ACP2_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP2_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP2_s <- rasterFromXYZ(ACP2_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP2_s)
levels <- seq(-46.55,-31.33,1.52)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYlBu')[10:1]
spplot(r_multiplica_data_ACP2_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='ACP2')
multiplica_data_ACP3 <- multiplica_data$Comp.3
summary(multiplica_data_ACP3)
ACP3_s <- cbind (multiplica_data_ACP3,s1,s2)
summary(ACP3_s)
ACP3_s_data <- as.data.frame(ACP3_s)
colnames(ACP3_s_data) <- c(names(ACP3_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP3_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP3_s <- rasterFromXYZ(ACP3_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP3_s)
levels <- seq(-6.35,6.15,1.21)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYlBu')[1:10]
spplot(r_multiplica_data_ACP3_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='ACP3')
plot(c)#se obtiene un "scree plot"
v1 <- c$loadings[,1]
v1
v1_1 <- sum(v1*v1)
v1_1
#Versión "manual" del scree plot:
nv <- ncol(islaIndepPt_TST_ACP) #no. de variables
nv
names(c)
c$sdev
```

```

var <- (c$sdev*c$sdev)*100/nv #varianzas explicadas por cada componente (en %)
var
vara <- var #varianzas acumuladas:
for(i in 2:nv) vara[i] <- vara[i]+vara[i-1]
plot(1:nv,var,type="l",lwd=2,col="blue",ylim=c(0,100),lab=c(10, 10, 1),
xlab="Componentes",ylab="Varianza (%)",main="Varianza explicada con datos
estandarizados", sub='Matriz de covarianza') #Scree plot
lines(vara,lwd=2,col="blue")
abline(100/nv,0,col="red") #añadimos referencia varianzas iniciales
grid()
points(var)
points(vara)
biplot(c) #gráfico 'biplot', de puntos y variables
biplot(c,xlabs=rep("+",dim(c$scores)[1])) #más claro, aunque menos informativo
biplot(c,choices=c(1,2)) #id., con las componentes 1 y 2
-----
#ROTACION
#-----
par(mfrow=c(1,1), mar=c(4,4,4,4))
v <- varimax(c$loadings[,1:4])
# tst_173_2009_t_253_285_144_192_199_099_131_179_250
labels <- c( '212_2003', '237_2003' , '173_2009','253_2009', '192_2010', '199_2010',
'099_2011', '131_2011','179_2011', '250_2011')
CP1_CP2 <- plot(v$loadings[,1], v$loadings[,2], main='Patrón de las componentes
principales ', lab=c(10, 10, 1) , cex.main=1,xlab='ACP1',ylab='ACP2',cex.lab=1,
cex.axis=1, bty='l') #gráfico con los factores de carga de las 2 primeras comp.
text(v$loadings[,1], v$loadings[,2],labels=labels,adj=c(1,1.5),cex=1, pos=4)
grid()
abline(h=0)
abline(v=0)
labels <- c( '212_2003', '237_2003' , '173_2009','253_2009', '192_2010', '199_2010',
'099_2011', '131_2011','179_2011', '250_2011')
CP1_CP3 <- plot(v$loadings[,3], v$loadings[,4], main='Patrón de las componentes
principales', lab=c(10, 10, 1) , cex.main=1,xlab='ACP3',ylab='ACP4',cex.axis=1, bty='l')
#gráfico con los factores de carga de las 2 primeras comp.
text(v$loadings[,3], v$loadings[,4],labels=labels,adj=c(1,1.5),cex=1, pos=2)
grid()
abline(h=0)
abline(v=0)
summary(v,loadings=TRUE)
v$loadings[,]
v$rotmat[,]
v$sdev[,]
load_matrix <- as.matrix (v$loadings)
load_matrix
write.table(load_matrix,file="loadings_v.csv",quote=FALSE,row.names=FALSE,sep=";"
)
multiplica <- islaIndepPt_TST_ACP_matrix %*% load_matrix
multiplica_data <- as.data.frame (multiplica)

```

```
multiplica_data_ACP1 <- multiplica_data$Comp.1
summary(multiplica_data_ACP1)
ACP1_s <- cbind (multiplica_data_ACP1,s1,s2)
ACP1_s_data <- as.data.frame(ACP1_s)
colnames(ACP1_s_data) <- c(names(ACP1_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP1_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP1_s <- rasterFromXYZ(ACP1_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP1_s)
levels <- seq(-629.5,-594.9,3.46)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYIBu')[1:10]
spplot(r_multiplica_data_ACP1_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='Principal patrón de TST de Zaragoza (ACP1)')
writeRaster(r_multiplica_data_ACP1_s,
filename='./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJ
ERO_ZARAGOZA/ACP1.tif', format='GTiff')
multiplica_data_ACP2 <- multiplica_data$Comp.2
ACP2_s <- cbind (multiplica_data_ACP2,s1,s2)
ACP2_s_data <- as.data.frame(ACP2_s)
colnames(ACP2_s_data) <- c(names(ACP2_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP2_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP2_s <- rasterFromXYZ(ACP2_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP2_s)
levels <- seq(417.1,440.9,2.38)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYIBu')[10:1]
spplot(r_multiplica_data_ACP2_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='Segundo patrón de TST de Zaragoza (ACP2)')
writeRaster(r_multiplica_data_ACP2_s,
filename='./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJ
ERO_ZARAGOZA/ACP2.tif', format='GTiff')
multiplica_data_ACP3 <- multiplica_data$Comp.3
ACP3_s <- cbind (multiplica_data_ACP3,s1,s2)
ACP3_s_data <- as.data.frame(ACP3_s)
colnames(ACP3_s_data) <- c(names(ACP3_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP3_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP3_s <- rasterFromXYZ(ACP3_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP3_s)
levels <- seq(399.6,429.5,2.99)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYIBu')[10:1]
spplot(r_multiplica_data_ACP3_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='Tercer patrón de TST de Zaragoza (ACP3)')
writeRaster(r_multiplica_data_ACP3_s,
filename='./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJ
ERO_ZARAGOZA/ACP3.tif', format='GTiff')
filename='./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJ
ERO_ZARAGOZA/ACP4.tif', format='GTiff')
#ESTACIONAL
```

```
islaGrid_TST<- cbind( tst_099_2011_grid, tst_131_2011_grid, tst_179_2011_grid,
tst_250_2011_grid) #unir grid que hemos cargado
islaIndepPt_TST <- as.data.frame(islaGrid_TST)
colnames(islaIndepPt_TST) <- c(names(islaIndepPt_TST)[1:4],'x','y')
islaIndepPt_TST_ACP <- islaIndepPt_TST[c(1:4)] #Se usara en ACP
coordinates(islaIndepPt_TST) <- c('x','y')
islaIndepPt_TST_ACP_matrix <- as.matrix(islaIndepPt_TST_ACP)
islaIndepPt_TST_ACP_matrix
par(mfrow=c(1,1), mar=c(8,4,4,4))
boxplot(islaIndepPt_TST_ACP, labels=TRUE,col="wheat", mar=c(2,2,2,2),
main='Resumen estadístico de las imágenes TST ', ylab='Temperatura [K]',
cex.main=1, las=2, cex.axis=1)
grid()
boxplot(islaIndepPt_TST_ACP$stats, plot=F)
#===== Análisis multivariante: ACP, agrupamiento, etc =====
#Análisis de componentes principales:
#islaIndepPt_TST_ACP <- islaIndepPt[c(1:10)] #se quitan x y y concatenando las
columnas restantes
#Princomp sin estandarizar datos, cada valor es absoluto.
c<-princomp(islaIndepPt_TST_ACP, cor=T, scores=TRUE) #matriz de correlacion cada
valor con peso abs
summary(c,loadings=TRUE)
summary(c,scores=TRUE)
c$loadings[,]#todos los valores, antes omitiR valores pocos significativos
c$sdev
print(c)
var <- ((c$sdev*c$sdev)/10) #varianzas explicadas por cada componente (en %)
vara <- var #varianzas acumuladas:
for(i in 2:nv) vara[i] <- vara[i]+vara[i-1]
plot(1:nv,var,type="l",lwd=2,col="blue",ylim=c(0,100),xlab="Componentes",ylab="Va
rianza (%)",main="Varianza explicada") #Scree plot
lines(vara,lwd=2,col="blue")
abline(100/nv,0,col="red") #añadimos referencia varianzas iniciales
grid()
points(var)
points(vara)
```

5.3 Script R para generar ACP multiespectral “verdor”

#51 Reflectividad

```
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011.asc',
  colname='Reflectividad')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_1_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_1.asc',
  colname='Banda 1')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_2_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_2.asc',
  colname='Banda 2')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_3_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_3.asc',
  colname='Banda 3')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_4_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_4.asc',
  colname='Banda 4')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_5_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_5.asc',
  colname='Banda 5')
#E:\LANDSAT_TM\estacional\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\r_051_2011_1.
asc
Reflec_7_51 <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/reflectividad_051_2011_6.asc',
  colname='Banda 7')
#-----
#uUNION DE BANDAS 1 a 7 51_2011
#-----
RefleGrid_051<- cbind( Reflec_1_51, Reflec_2_51, Reflec_3_51, Reflec_4_51,
Reflec_5_51, Reflec_7_51) #unir grid que hemos cargado
ReflecIndepPt_051 <- as.data.frame(RefleGrid_051)
colnames(ReflecIndepPt_051) <- c(names(ReflecIndepPt_051)[1:6], 'x', 'y')
ReflecIndepPt_051_ACP <- ReflecIndepPt_051[c(1:6)] #Se usara en ACP
coordinates(ReflecIndepPt_051) <- c('x','y')
summary(ReflecIndepPt_051)
#class(ReflecIndepPt_051)
```

```
summary(ReflecIndepPt_051_ACP)
class (ReflecIndepPt_051_ACP)
ReflecIndepPt_051_ACP_matrix <- as.matrix(ReflecIndepPt_051_ACP)
ReflecIndepPt_051_ACP_matrix
#===== Análisis multivariante: ACP, agrupamiento, etc =====
#Princomp sin estandarizar datos, cada valor es absoluto. sin estandarizar
c<-princomp(ReflecIndepPt_051_ACP, cor=FALSE, scores=TRUE) #matriz de
covarianza cada valor con peso
summary(c,loadings=TRUE)
summary(c,scores=TRUE)
nv <- ncol(ReflecIndepPt_051_ACP) #no. de variables
load_matrix <- as.matrix (c$loadings)
load_matrix
summary(load_matrix)
c$loadings[,]#todos los valores, antes omitia valores pocos significativos
c$sdev
print(c)
var <- ((c$sdev*c$sdev)) #varianzas explicadas por cada componente (en %)
var
var1 <- (var*100)/sum(var)
var1
vara <- var1 #varianzas acumuladas:
for(i in 2:nv) vara[i] <- vara[i]+vara[i-1]
plot(1:nv,var1,type="l",lwd=2,col="blue",ylim=c(0,100),xlab="Componentes",ylab="V
arianza (%)",main="ACP, Día juliano 51", sub='Matriz de covarianza') #Scree plot
lines(vara,lwd=2,col="blue")
abline(100/nv,0,col="red") #añadimos referencia varianzas iniciales
grid()
points(var1)
points(vara)
multiplica <- ReflecIndepPt_051_ACP_matrix %*% load_matrix
summary(multiplica)
class(multiplica)
multiplica_data <- as.data.frame (multiplica)
summary(multiplica_data)
multiplica_data_ACP1 <- multiplica_data$Comp.1
summary(multiplica_data_ACP1)
ACP1_s <- cbind (multiplica_data_ACP1,s1,s2)
summary(ACP1_s)
ACP1_s_data <- as.data.frame(ACP1_s)
colnames(ACP1_s_data) <- c(names(ACP1_s_data)[1:1],'x','y')
coordinates(ACP1_s_data) <- c('x','y')
r_multiplica_data_ACP1_s<-rasterFromXYZ(ACP1_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP1_s)
writeRaster(r_multiplica_data_ACP1_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_sin_st/ACP1.tif',
format='GTiff')
multiplica_data_ACP2 <- multiplica_data$Comp.2
```

```

summary(multiplica_data_ACP2)
ACP2_s <- cbind (multiplica_data_ACP2,s1,s2)
summary(ACP2_s)
ACP2_s_data <- as.data.frame(ACP2_s)
colnames(ACP2_s_data) <- c(names(ACP2_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP2_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP2_s <- rasterFromXYZ(ACP2_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP2_s)
writeRaster(r_multiplica_data_ACP2_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_sin_st/ACP2.tif',
format='GTiff')
multiplica_data_ACP3 <- multiplica_data$Comp.3
summary(multiplica_data_ACP3)
ACP3_s <- cbind (multiplica_data_ACP3,s1,s2)
summary(ACP3_s)
ACP3_s_data <- as.data.frame(ACP3_s)
colnames(ACP3_s_data) <- c(names(ACP3_s_data)[1:1], 'x', 'y')
coordinates(ACP3_s_data) <- c('x', 'y')
r_multiplica_data_ACP3_s <- rasterFromXYZ(ACP3_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP3_s)
levels <- seq(-629.5,-594.9,3.46)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYIBu')[1:10]
spplot(r_multiplica_data_ACP3_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='Principal patrón de TST de Zaragoza (ACP3)')
writeRaster(r_multiplica_data_ACP3_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_sin_st/ACP3.tif',
format='GTiff')
multiplica_data_ACP4 <- multiplica_data$Comp.4
#-----
#Princomp estandarizando datos, cada valor es relativo, estandarizando
#-----
c<-princomp(RefleclndepPt_051_ACP, cor=TRUE, scores=TRUE) #matriz de
correlaciones, estandarizando datos, cada valor con peso relativo no abs
summary(c,loadings=TRUE)
summary(c,scores=TRUE)
c$loadings[,]#todos los valores, antes omitia valores pocos significativos
load_matrix <- as.matrix (c$loadings)
load_matrix
summary(load_matrix)
#Versión "manual" del scree plot:
nv <- ncol(RefleclndepPt_051_ACP) #no. de variables
var <- (c$sdev*c$sdev)*100/nv #varianzas explicadas por cada componente (en %)
vara <- var #varianzas acumuladas:
for(i in 2:nv) vara[i] <- vara[i]+vara[i-1]
plot(1:nv,var,type="l",lwd=2,col="blue",ylim=c(0,100),lab=c(10, 10, 1),
xlab="Componentes",ylab="Varianza (%)",main="ACP, Día juliano 51", sub='Matriz de
correlación') #Scree plot
lines(vara,lwd=2,col="blue")

```

```
abline(100/nv,0,col="red") #añadimos referencia varianzas iniciales
grid()
points(var)
points(vara)
multiplica <- ReflecIndepPt_051_ACP_matrix %*% load_matrix
multiplica_data <- as.data.frame (multiplica)
summary(multiplica_data)
multiplica_data_ACP1 <- multiplica_data$Comp.1
summary(multiplica_data_ACP1)
ACP1_s <- cbind (multiplica_data_ACP1,s1,s2)
ACP1_s_data <- as.data.frame(ACP1_s)
colnames(ACP1_s_data) <- c(names(ACP1_s_data)[1:1],'x','y')
coordinates(ACP1_s_data) <- c('x','y')
r_multiplica_data_ACP1_s<-rasterFromXYZ(ACP1_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP1_s)
writeRaster(r_multiplica_data_ACP1_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_con_st/ACP1.tif',
format='GTiff')
multiplica_data_ACP2 <- multiplica_data$Comp.2
summary(multiplica_data_ACP2)
ACP2_s <- cbind (multiplica_data_ACP2,s1,s2)
ACP2_s_data <- as.data.frame(ACP2_s)
colnames(ACP2_s_data) <- c(names(ACP2_s_data)[1:1],'x','y')
coordinates(ACP2_s_data) <- c('x','y')
r_multiplica_data_ACP2_s<-rasterFromXYZ(ACP2_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP2_s)
writeRaster(r_multiplica_data_ACP2_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_con_st/ACP2.tif',
format='GTiff')
multiplica_data_ACP3 <- multiplica_data$Comp.3
ACP3_s <- cbind (multiplica_data_ACP3,s1,s2)
ACP3_s_data <- as.data.frame(ACP3_s)
colnames(ACP3_s_data) <- c(names(ACP3_s_data)[1:1],'x','y')
coordinates(ACP3_s_data) <- c('x','y')
r_multiplica_data_ACP3_s<-rasterFromXYZ(ACP3_s_data, res=c(25,25), crs=NA,
digits=5)
plot(r_multiplica_data_ACP3_s)
levels <- seq(-629.5,-594.9,3.46)
perimetro.pal <- brewer.pal(10,'RdYIBu')[1:10]
spplot(r_multiplica_data_ACP3_s, sp.layout=islaLayout, at=levels,
col.regions=perimetro.pal , main='Principal patrón de TST de Zaragoza (ACP3)')
writeRaster(r_multiplica_data_ACP3_s,
filename='./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/acp_con_st/ACP3.tif',
format='GTiff')
```


5.4 Script R para generar regresión lineal, comparación “verdor”.

```
# ndvi_179_sc(SpatialPointsDataFrame)
ndvi_179_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/ndvi_179_2011.as
c',
, colname='ndvi_179_2011')
#acp_cov179
acp_cov179_grid <-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/acp_cov179_m1.a
sc',
, colname='acp_cov_179_2011')

#acp_corr179.asc
acp_corr179_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/acp_corr179.asc',
, colname='acp_corr_179_2011')
#ttc_179_2011.asc
ttc_179_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/ttc_179_2011.asc
',
, colname='ttc_179_2011')
#\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\tcc_051_2011_1.asc
ttc_051_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/tcc_051_2011_1.
asc',
, colname='ttc_051_2011')
#\LT51990312011051MPS00\modelo_tst\tcc_051_2011_1.asc
ndvi_051_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/ndvi_051_2011.as
c',
, colname='ndvi_051_2011')
#\LT52000312011250MPS00\modelo_tst\tcc_250_2011_1.asc
ttc_250_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT52000312011250MPS00/modelo_tst/tcc_250_2011.asc
',
, colname='ttc_250_2011')
#\LT52000312011250MPS00\modelo_tst\tcc_250_2011_1.asc
ndvi_250_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT52000312011250MPS00/modelo_tst/ndvi_250_2011.as
c',
, colname='ndvi_250_2011')
#\LT51990312011099MPS00\modelo_tst\tcc_099_2011_1.asc
ttc_099_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011099MPS00/modelo_tst/tcc_099_2011.asc
',
, colname='ttc_099_2011')
#\LT51990312011099MPS00\modelo_tst\tcc_099_2011_1.asc
```

```
ndvi_099_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011099MPS00/modelo_tst/ndvi_099_2011.as
c',
, colname='ndvi_099_2011')
tabla <-
write.table(vegetation_Grid,file="./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst
/tabla.csv",quote=FALSE,row.names=FALSE,sep=";")
#Union de capas de verdor
vegetation_Grid<- cbind (ndvi_179_grid, acp_cov179_grid, acp_corr179_grid,
ttc_179_grid,ttc_051_grid, ndvi_051_grid,ttc_250_grid, ndvi_250_grid,ttc_099_grid,
ndvi_099_grid )
vegetation_IndepPt <- as.data.frame(vegetation_Grid)
colnames(vegetation_IndepPt) <- c(names(vegetation_IndepPt)[1:10],'x','y')
summary(vegetation_IndepPt)
summary (vegetation_Grid)
par(mfrow=c(1,3),mar=c(5,5,5,5))
#NDVI vs acp_cov
plot(vegetation_Grid$acp_cov_179_2011~ vegetation_Grid$ndvi_179_2011,
main='Día juliano 179', xlab='NDVI', ylab='ACP covarianza', xlim=c(-1, 1),
cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2, sub='R=0.528', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(vegetation_Grid$acp_cov_179_2011~ vegetation_Grid$ndvi_179_2011))
verdor.lm_cov <- lm(vegetation_Grid$acp_cov_179_2011~
vegetation_Grid$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_cov)
#NDVI vs acp_corr
plot(vegetation_Grid$acp_corr_179_2011~ vegetation_Grid$ndvi_179_2011,
main='Día juliano 179', xlab='NDVI', ylab='ACP correlación', xlim=c(-1, 1),
cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2, sub='R=0.409', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(vegetation_Grid$acp_corr_179_2011~ vegetation_Grid$ndvi_179_2011))
verdor.lm_cor<- lm(vegetation_Grid$acp_corr_179_2011~
vegetation_Grid$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_cor)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_179<- plot(vegetation_Grid$ttc_179_2011~
vegetation_Grid$ndvi_179_2011, main='Día juliano 179', xlab='NDVI', ylab='Tasseled
Cap', xlim=c(-1, 1), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2, sub='R=0.899', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(vegetation_Grid$ttc_179_2011~ vegetation_Grid$ndvi_179_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(vegetation_Grid$ttc_179_2011~
vegetation_Grid$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_051<- plot(vegetation_Grid$ttc_051_2011~
vegetation_Grid$ndvi_051_2011, , main='Día juliano 179', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), ylim=c(-30, 40), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.861, y=34.28x-10.6', cex.sub=1.5)
grid()
```

```
abline(lm(vegetation_Grid$ttc_051_2011~ vegetation_Grid$ndvi_051_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(vegetation_Grid$ttc_051_2011~
vegetation_Grid$ndvi_051_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
#Zaragoza_verdor
par(mfrow=c(1,1),mar=c(5,5,1.5,3))
Zaragoza <-
readShapePoly('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_C
ALLEJERO_ZARAGOZA/barrios/zaragoza_verdor84.shp')
summary(Zaragoza)
plot(Zaragoza,border='brown')
Zaragoza_sample <- spsample(Zaragoza, n=300, type='random')
class(Zaragoza_sample)
plot(Zaragoza_sample,col='red', pch=19, add=T)
Vegetation_ZaragozaPt <- merge(Zaragoza_sample, overlay(vegetation_Grid,
Zaragoza_sample ))
summary (Vegetation_ZaragozaPt)
par(mfrow=c(1,3),mar=c(5,5,5,5))
#NDVI vs acp_cov
plot(Vegetation_ZaragozaPt$acp_cov_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, main='Día juliano 179', xlab='NDVI',
ylab='ACP covarianza', xlim=c(0, 1), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.539', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$acp_cov_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011))
verdor.lm_cov <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$acp_cov_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_cov)
#NDVI vs acp_corr
plot(Vegetation_ZaragozaPt$acp_corr_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, main='Día juliano 179', xlab='NDVI',
ylab='ACP correlación', xlim=c(0, 1), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.451', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$acp_corr_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011))
verdor.lm_cor <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$acp_corr_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_cor)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_179 <- plot(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, main='Día juliano 179', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2, sub='R=0.954',
cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
```

```
summary(verdor.lm_ttc)
par(mfrow=c(1,4),mar=c(5,5,2,2))
#NDVI vs ttc
plot_ttc_051<- plot(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_051_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_051_2011, main='Día juliano 51', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), ylim=c(-30, 40), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.861, y=34.28x-10.6', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_051_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_051_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_051_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_051_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_099<- plot(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_099_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_099_2011, main='Día juliano 99', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), ylim=c(-30, 40), cex.main=2.5, cex.lab=2,
cex.axis=2, sub='R=0.921, y=56.75x-22.6', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_099_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_099_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_099_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_099_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_179<- plot(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, main='Día juliano 179', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), ylim=c(-30, 40), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.954, y=77.34x-22.4', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_179_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_179_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
#NDVI vs ttc
plot_ttc_250<- plot(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_250_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_250_2011, main='Día juliano 250', xlab='NDVI',
ylab='Tasseled Cap', xlim=c(0, 1), ylim=c(-30, 40), cex.main=2.5, cex.lab=2, cex.axis=2,
sub='R=0.938, y=69.79x-20.4', cex.sub=1.5)
grid()
abline(lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_250_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_250_2011))
verdor.lm_ttc <- lm(Vegetation_ZaragozaPt$ttc_250_2011~
Vegetation_ZaragozaPt$ndvi_250_2011, data=vegetation_IndepPt)
summary(verdor.lm_ttc)
```

5.5 Script R para análisis de conglomerados.

```
#-----  
#Cluster  
#-----  
  
# ACP1_TST (SpatialPointsDataFrame)  
ACP1_TST_grid <-  
readAsciiGrid('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CA  
LLEJERO_ZARAGOZA/ACP1.asc',  
  dec=',', colname='ACP1_TST')  
#summary(tst_199_2010_grid)  
#dim(tst_199_2010_grid)  
  
#ttc_179_2011.asc Verdor  
ttc_179_grid<-  
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/ttc_179_2011.asc  
,  
  , colname='ttc_179_2011')  
  
# MDE(SpatialPointsDataFrame)  
MDE_grid <- readAsciiGrid('./MDE/mde_masc/mde_masc.asc',  
  dec=',', colname='MDE')  
summary(MDE_grid)  
dim(MDE_grid)  
  
#.Diistancia el rio  
#/red_hidrografica/rios_erdas.asc  
dist_rio_grid <- readAsciiGrid('./red_hidrografica/rios_erdas.asc',  
  dec=',', colname='dist_rio')  
#summary(dist_rio_grid)  
#dim(dist_rio_grid)  
  
#den_pob25_grid normaklizado a 255(SpatialPointsDataFrame)  
#denpob_norm_grid <- readAsciiGrid('./catastro/ZGZ Catastro Arc  
View/erdas/den_norma2/den_norma2.asc',  
  # dec=',', colname='denpob_norm')  
#summary(denpob_norm_grid)  
#dim(denpob_norm_grid)  
  
#cohesion(SpatialPointsDataFrame)  
cohesion_grid <-  
readAsciiGrid('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CA  
LLEJERO_ZARAGOZA/cohesion_nor8/cohesion_nor8.asc',  
  dec=',', colname='cohesion')  
summary(cohesion_grid)  
#dim(cohesion_grid)
```

```
#Distancia a centro plaza española. ayuntamiento(SpatialPointsDataFrame)
dist_centro_grid <-
readAsciiGrid('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/pe_eu/pe_eu.asc',
  dec=',', colname='dist_centro')
#summary(dist_centro_grid)
#dim(dist_centro_grid)

#Perimetro(SpatialPointsDataFrame)
perimetro_grid <-
readAsciiGrid('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/perimetro1/perimetro1.asc',
  dec=',', colname='perimetro')
#summary(perimetro_grid)
#dim(perimetro_grid)

#ALbedo(SpatialPointsDataFrame)
albedo_norm_grid <-
readAsciiGrid('./estacional/LT52000312010199MPS01/modelo_tst/albedo_fin/albedo_fin.asc',
  dec=',', colname='albedo norm')
#summary(albedo_norm_grid)
#dim(albedo_norm_grid)

#Orientacion con todo (SpatialPointsDataFrame)
orientado_grid <-
readAsciiGrid('./callejero/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/CARTOCIUDAD_CALLEJERO_ZARAGOZA/oriencion/orientacion.asc',
  dec=',', colname='orientado')
#summary(orientado_grid)
#dim(orientado_grid)

# ndvi_179_sc(SpatialPointsDataFrame)
ndvi_179_grid<-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/ndvi_179_2011.asc',
  , colname='ndvi_179_2011')
#acp_cov179
acp_cov179_grid <-
readAsciiGrid('./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/acp_cov179_m1.asc',
  , colname='acp_cov_179_2011')

tst_099_2011_grid <- readAsciiGrid (
  './estacional/LT51990312011099MPS00/modelo_tst/tst_099_2011.asc',
  dec=',', colname='Día_099_2011')
```

```

tst_179_2011_grid <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011179MPS00/modelo_tst/tst_179_2011.asc',
dec=',', colname='Día_179_2011')

tst_250_2011_grid <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT52000312011250MPS00/modelo_tst/tst_250_2011.asc',
dec=',', colname='Día_250_2011')

tst_051_2011_grid <- readAsciiGrid (
'./estacional/LT51990312011051MPS00/modelo_tst/tst_051_2011.asc',
dec=',', colname='Día_051_2011')

# pendiente(SpatialPointsDataFrame)
pendiente_grid <- readAsciiGrid('./MDE/pendiente.asc',
dec=',', colname='Pendiente')
summary(pendiente_grid)
dim(pendiente_grid)

#-----
#UNION DE TODOS LOS RASTER EN UNA MATRIZ todos
#-----
par(mfrow=c(1,1),mar=c(1,5,2,0))

islaGrid<- cbind(ACP1_TST_grid, ttc_179_grid, MDE_grid, dist_rio_grid,
cohesion_grid, dist_centro_grid, perimetro_grid, ndvi_179_grid, acp_cov179_grid,
tst_099_2011_grid, tst_179_2011_grid, tst_250_2011_grid, pendiente_grid) #
albedo_norm_grid      , dist_rio_grid, cohesion_grid ) #unir 3 grid que hemos
cargado
#summary(islaGrid)
#class(islaGrid)
islaIndepPt <- as.data.frame(islaGrid)
summary(islaIndepPt)
#class(islaIndepPt)
colnames(islaIndepPt) <- c('Patrón TST 2011 (ACP)', 'Verdor(TC)', 'MDE', 'Distancia el
río', 'Compacidad urbana', 'Distancia al centro', 'Distancia desde
perifería', 'Verdor(NDVI)', 'Verdor (ACP2)', 'TST,9 de abril ', 'TST,28 de junio', 'TST,7 de
septiembre', 'Pendiente topográfica', 'x', 'y')
#summary(islaIndepPt)
islaIndepPt_cluster <- islaIndepPt[c(1:13)] #Se usara en cluster
coordinates(islaIndepPt) <- c('x','y')
summary(islaIndepPt)
#class(islaIndepPt)

islaIndepPt_matrix <- as.matrix(islaIndepPt_cluster)
islaIndepPt_cluster
islaIndepPt_matrix
#Otro ejemplo, partiendo de la matriz de correlaciones(standariza):
zzz <- cor(islaIndepPt_matrix)
zzz
zz <- 1-cor(islaIndepPt_matrix) #matriz de disimilaridad (1 - r)

```

```
zz
hc <- hclust(as.dist(zz),method="ward")
plot(hc,main="",xlab="Capas de información",ylab="Matriz de disimilaridad",cex=1.5,
hang=-10, cex.lab=1.5, cex.axis=1.5)
#-----
#UNION DE TODOS LOS RASTER EN UNA MATRIZ los mas significativos para el
estudio final #-----
islaGrid<- cbind(ACP1_TST_grid, ttc_179_grid, pendiente_grid, dist_rio_grid,
cohesion_grid) # albedo_norm_grid , dist_rio_grid,cohesion_grid ) #unir 3
grid que hemos cargado
#summary(islaGrid)
#class(islaGrid)
islaIndepPt <- as.data.frame(islaGrid)
#summary(islaIndepPt)
#class(islaIndepPt)
colnames(islaIndepPt) <- c('Patrón TST 2011 (ACP)', 'Verdor(TC)', 'Pendiente
topográfica', 'Distancia el río', 'Compacidad urbana', 'x', 'y')
#summary(islaIndepPt)
islaIndepPt_cluster <- islaIndepPt[c(1:5)] #Se usara en cluster
coordinates(islaIndepPt) <- c('x', 'y')
summary(islaIndepPt)
#class(islaIndepPt)

islaIndepPt_matrix <- as.matrix(islaIndepPt_cluster)
islaIndepPt_cluster
#matriz correlacion
islaIndepPt_matrix_cor <- cor(islaIndepPt_matrix)
islaIndepPt_matrix_cor

par(mfrow=c(1,1),mar=c(1,5,2,0))
#distancias_euclidiadas <- dist(t(islaIndepPt_matrix)) #matriz de distancias euclídeas
(distancias_euclidiadas)
#distancias_euclidiadas #podemos ver los resultados
#h <- hclust(distancias_euclidiadas,method="ward") #hacemos una clasificación
jerárquica
#plot(h) #representamos el dendrograma
#Otro ejemplo, partiendo de la matriz de correlaciones(standariza):
zz <- 1-cor(islaIndepPt_matrix) #matriz de disimilaridad (1 - r)
hc <- hclust(as.dist(zz),method="ward")
plot(hc,main="",xlab="Capas de información",ylab="Matriz de disimilaridad",cex=1.5,
hang=-10, cex.lab=1.5, cex.axis=1.5)
```


5.6 Script R para Proceso de Análisis Jerárquico.

```
#cinco elementos

w1_w1 <- 1
w1_w2 <- 1
w1_w3 <- 3
w1_w4 <- 5
w1_w5 <- 5
w2_w1 <- 1/w1_w2
w2_w2 <- 1
w2_w3 <- 3
w2_w4 <- 5
w2_w5 <- 5
w3_w1 <- 1/w1_w3
w3_w2 <- 1/w2_w3
w3_w3 <- 1
w3_w4 <- 3
w3_w5 <- 3
w4_w1 <- 1/w1_w4
w4_w2 <- 1/w2_w4
w4_w3 <- 1/w3_w4
w4_w4 <- 1
w4_w5 <- 1
w5_w1 <- 1/w1_w5
w5_w2 <- 1/w2_w5
w5_w3 <- 1/w3_w5
w5_w4 <- 1/w4_w5
w5_w5 <- 1

a1 <- c(w1_w1, w1_w2, w1_w3, w1_w4, w1_w5)
a2 <- c(w2_w1, w2_w2, w2_w3, w2_w4, w2_w5)
a3 <- c(w3_w1, w3_w2, w3_w3, w3_w4, w3_w5)
a4 <- c(w4_w1, w4_w2, w4_w3, w4_w4, w4_w5)
a5 <- c(w5_w1, w5_w2, w5_w3, w5_w4, w5_w5)

weights_5 <- rbind(a1,a2,a3, a4, a5)
eigvalor_max <- eigen(weights_5)$values[1]
eigvector <- eigen(weights_5)$vectors[,1]
eigvector_sum <- sum(eigvector)
eigvector_norm <- eigvector/eigvector_sum
eigvector_norm

n <- length(a1)
CI <- (eigvalor_max-n) / (n-1)
CI
CR=CI/1.11
CR
```

BIBLIOGRAFÍA

Acero JA. (2011) PhD Urban climate modeling: Development of urban climate evaluation methods for urban planning purposes, Faculty of Architecture, Urban and Landscape Planning at the University Kassel.

Akbari H., Taha H., (1992), "The impact of trees and White surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities", *Energy*, Vol, 17 ,141-149.

Akbari H., Konopacki S., (2005), "Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies", *Energy Policy*, 33, 721-756.

Akinaru I, Akira H, (1996), "Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data", *Energy and Buildings* 23 199-205.

Arnfield AJ., Grimmond. C.,(1998), An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and buildings*, 27: 61–68.

Aseada T., Thanh V., (1996), "Heat storage of pavement and effects on the lower atmosphere" *Atmospheric Environment*, Vol 30, No 3, 413-427.

Ashie Y, Thanh V C, Asaeda T., (1999), Building canopy model for the analysis of urban climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 237–248.

ASHRAE, Handbook of fundamentals 2001

Baumüller J, Hoffmann U, Reuter U.,(1992), "Climate booklet for urban development", Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg (Wirtschaftsministerium), Environmental Protection Department (Amt fur Umweltschutz).

Becker, F., Li, Z.-L., (1990), Temperature-independent spectral indices in TIR bands, *Remote Sensing of Environment*, 32 (1), 17-33.

Berg R., Quinn W., (1978), "Use light colored surface to reduce seasonal thaw penetration beneath embankments on permafrost", *Proceedings of the International symposium on cold regions*, University of Alaska, pp 86-99.

Blocken B., Defraeye T., (2009), "High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building", *Building and Environment* 44, 2396–2412.

Boegh E., Soegaard H., Hanan N., Kabat P., Lesch, L., (1999), A remote sensing study of the NDVI–T–s relationship and the transpiration from sparse vegetation in the

Sahel based on high-resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 69, 224–240.

Byrne G., Crapper P.F., Mayo K.K., (1980), Monitoring land cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. *Remote Sensing Environment*, 10: 175-184.

Chander G., Markham B., (2009), "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors", *Remote Sensing of Environment*, 893–903.

Chapman A. J. , (1984), "Heat Transfer", 4 Edition, New York: Macmillan Publishing Company.

Chavez P.S., (1996), "Image-based atmospheric corrections—Revisited and improved," *Photo. Eng. Remote Sens.*, vol. 62, pp. 1025–1036.

Christen A., Vogt R., (2004), Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24: 1395–1421.

Chuvieco, E., (1996), "Fundamentos de Teledetección Espacial"- 3ª Edición revisada REF.REVISTA/LIBRO: Madrid, Rialp.

Climate Atlas, (1992), Stuttgart Regional Federation, Naschbarschaftsverband, Stuttgart.

Colby, J.D., Keating, P.L, (1998), Land cover classification using Landsat TM imagery in the tropical highlands: the influence of anisotropic reflectance. *International Journal of Remote Sensing*.

Cole R.J., Sturrock N.S., (1977), The convective heat exchange at external surface of buildings, *Building and Environment*, Vol 12.

Conese C., Maracchi G., Miglietta F., Maselli F., (1988), Forest classification by principal components analysis of TM data, *Int. J. Remote Sens.* 9(10–11):1597–1612.

Conrads L.A., Van der Hag, J.C.H., (1971), A new method of air-temperature measurement in urban studies., *Atmos. Environ*, 5, 629-635.

Crist E.P., Cicone R.C., (1984), A physically-based transformation of Thematic Mapper data the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 22: 256–263.

Crist, E. P., Laurin R., Cicone R. C., (1986), Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In Proceedings of IGARSS '86 Symposium, 1465-70. Ref. ESA SP-254, Paris.

Cuadrat Prat, Saz M., (2002), "Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS", Departamento de Geografía y ordenación del territorio. UNIZAR.

Dash P., Gottsche F.-M., Olesen F.-S., Fischer H., (2002), Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (13), 2563_2594.

Deardorff, J.W., (1978), Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83(C4): 1889–1903.

Duckworth E., Sandberg J., (1954), "The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients", *Bulletin of American Meteorological Society*.

Dupont S., Otte T., Ching J K S., (2004), Simulation of Meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5). *Boundary Layer Meteorology*, 113: 111–158.

Eastman, J. R., and Fulk, M., (1993), Long sequence time series evaluation using standardized principal components. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 59(8):1307–1312.

Eklundh L., (1993), A comparative analysis of standardised and unstandardised Principal Components Analysis in remote sensing, *J. Remote Sensing Vol 14 No.7*, 1359,1370.

Ekstrand, S., (1996), Landsat TM-based forest damage assessment: correction for topographic effects. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (2), 151–161.

Eliasson, I., (1996), Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment* 30 (3), 379_392.

Escolano S., (2011), "Sobre la medición de la forma del espacio urbano: Aplicación a Santiago de Chile y a Zaragoza", Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, ISBN: 978-84-92522-31-6.

Escourrou G., (1991), "Le climat et la Ville" Nathan University Editions, Paris.

Fanger P.O., (1970), "Thermal Comfort", Copenhagen: Danish Technical Press.

Franca G.B., Cracknell, A.P., (1994), Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 15 (8), 1695-1712.

Fung, L., LeDrew E., (1987), Application of principal components analysis to change detection., *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 53(12):1649–1658.

Gaddes P., (1915), *Cities in evolution*. Londres, Benn 1968, pp 409 (traducción *Ciudades en evolución*; Buenos Aires, Ed. Infinito, 1960, pp 301.

Gao W., (1993), "Thermal effects of open space with green areas on urban environment: Analysis and its application", *Journal of Architectural Planning and Environmental Engineering*, No.488.

García J.R., (2009), "Evaluación de cubiertas verdes para confort térmico y ahorro de energía", XIII Semana de la energía solar, Guadalajara, México.

Gillespie, A.R., (1985), Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. In: *Proceedings TIMS Data User's Workshop*. Jet Propulsion Laboratory, JPL Pub. 86-38, Pasadena, California, pp. 29-44.

Giridharan R., Ganesan S., Lau S.Y., (2004), Daytime urban heat island effect in high-rise and high density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36: 525–534.

Goetz, S. J., (1997). Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1), 71–94.

Gonzalez R.C., Wintz P., (1977), *Digital Image Processing*, Massachusetts, Addison Wesley.

Goward S. N., Cruickshanks G. D., Hope, A. S., (1985). Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape. *Remote Sensing of Environment*, 18, 137–146.

Gridharan R., Ganesan S., Lau. S., (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high – density residential developments in Hong Kong, *Energy and Buildings*, 36.

Habermas Jürgen, (1988), "El discurso filosófico de la modernidad", Editorial Taurus, Madrid.

Higueras E., (1997), "Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos, urbanismo bioclimático", Tesis doctoral Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Higueras E., (2006), "Urbanismo bioclimático", Editorial Gustavo Gili, pp 14-16.

Höppe P., (1999), The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment., *Int. J. Biometeorol*, 43: 71-75.

Horler, D. N. H., Ahern, F. J, (1986), Forestry information content of Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sens*, 7(3):405-428.

Hostler C.L., Landsberg H.E., (1977), "The effect localized man-made heat and academy of science", Washington, DC.

Hung T., Uchihama D., Ochi S., Yasuoka Y., (2006), Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-Information*, 8(1): 34-48.

IDAE, (2000), "Guía de planteamiento urbanístico energéticamente eficiente", Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Jain S.P., Rao K.R., (1974), Experimental study on the effect of roof spray cooling on unconditioned and conditioned buildings. *Building Science*, 9(1): 9-16.

Jauregui E., (1997), Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31, 3821-3831.

Jensen J. R., (1996), *Introduction to Digital Image Processing*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A, (2003), A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 108 (22), ACL 2-1- ACL 2-9.

Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A, (2006), Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data. *International Journal Remote Sensing*, 27 (5), 999-1014.

Katzchner L. (1998), Designation of urban climate qualities and their implementation in the planning process, *Environmental friendly cities, PLEA 98*, 75-78, James & James Sciences Publishers Ltd. Lisbon, Portugal.

Kauth R.J., Thomas G.S., (1976), "The tasseled cap-A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat," in *Proc. the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 41-50.

Kauth R.J., Lambeck P.F., Richardson W., Thomas G. S. , Pentland A. P., (1979), "Feature extraction applied to agricultura crops as seen by Landsat," in *Proc. Technical Sessions, The LACIE Symposium, JSC 16015*, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas, vol II., pp. 705-721.

Kikegawa Y., Genchi Y., Yoshikado H., Kondo H., (2003), Deveopment of a numeral simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings energy demands, *Applied Energy*, 76: 449-466.

Kim Y., Baik J., (2005), Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44: 591–605.

Kim Y., Baik J., (2004), Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theoretical and Applied Climatology*, 79: 151–164.

Klysik K., Foruniak K., (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33, 3885-3895.

Kondoh A, Nishiyama J., (1999), Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Advances in Space Research*, 26: 1173–1176.

Kunmar R., Kaushik S.C., (2005), "Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings"; *Building and Environment* 40, 1505–1511.

Landsberg, H. E. (1981), *The urban climate*. New York: Academic Press.

Lawrence Berkeley Laboratory, (1998), "Roof coatings, solar reflectance and thermal properties of roof materials"; <http://eetd.lbl.gov/CoolRoofs/>.

Lemonsu, A., Masson, V., (2002). Simulation of summer urban breeze over Paris. *Boundary Layer Meteorology*, 104, 463-490.

Lindqvist S., (1992), "Local climatological modelling for road stretches and urban areas", *Geografiska Annaler*, Vol.74, 265-274.

Matzarakis A., Mayer H.,(1999), Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature., *Int. J. Biometeorol*, 43: 76-84.

McPherson E.G., Simpson J.R., (1989), "Effect of tree landscape treatments on residential energy and water in Tucson", *Energy and Buildings*, Vol 23, 127-138.

Moffat A., Schiler M., (1981), "Landscape design that saves energy", William Morrow and company, New York.

Montgomery D., (1987), "Landscaping as a passive solar strategy", *Passive solar journal*, Vol. 4, No.1, 77-108.

Moriyama, M., Takebayashi, H., (1999), Making method of "klimatope" map based on normalized vegetation index and one dimensional heat budget model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 81:211-220.

Narumi D., Kondo A., (2009), "Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity", *Environmental Research* 109 421-431.

Nemani R. R., Running, S. W., (1989), Estimation of regional surfaceresistance to evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 276-284.

Ng E., Ren C., Katzchne , L., (2009), Urban climatic studies for hot and humedal tropical coastal city of Hong Kong.

Nieto H., Sandholt I., Chuvieco E., (2011), "Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: Calibration an validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula, *Remote Sensing of Environment*, 115, 107-116.

Nuñez M., Oke T.R., (1977), "The energy balance of an urban canyon". *Journal of Applied Meteorology*; 16: 11-9.

Oguntoyinbo J.S., (1986), "Some aspects of the urban climates of tropical Africa", *World Meteorological Organization Report*, 110-135.

Oke T.R. (1978), "Boundary Layer Climates", Methuen, London.

Onmura S., Matsumoto M., Hokoi S., (2001), "Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens". *Energy and Buildings*;33: 653-66.

Pares M., (1985), “ Descombrir el Medi Urba”, Ecologia d’na Ciutat: Barcelona, Centre del Medi Urban.

Pearlmutter D., Berliner P., (2007), “Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons”, Building abs environment, 42, 2396-2409.

Peckham R.J., Jordan G., (2007): Development and Applications in a Policy Support Environment Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Heidelberg.

Pongracz R., Bartholy J., Dezso Z., (2006), Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37(12): 2191–2196.

Prata, A.J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J.A., Otle, C., (1995), Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects.

Prince, S. D., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Czajkowski, K. P., Thawley, M. (1998). Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using advanced very high-resolution radiometer satellite observations: Comparison with field observations. *Journal of Hydrology*, 213(1–4), 230–249.

Rao, P.K, (1972), Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53: 647-648.

Ready P.J., Wintz P.A., (1972), Multispectral Data Compression through Transform Coding and Block Quantization, Laboratory for Applications of Remote Sensing.

Ren C., Ng C, Katzchner L, (2008), Urban Climatic Map and Study, Department of Architecture, CUHK.

Ren C., Ng C, Katzchner L., (2010), Urban climatic map studies: a review, *International Journal of climatology*, DOI:10.1002/joc.2237

Richards J.A., (1986), Remote sensing Digital Image Analysis, Berlin:Springer-Verlag.

Rizwan A., Dennis Y., (2008), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, *Journal of environmental science*, 120-128.

Rosenfeld A. H., Akbari H., Romm J. J., (1998), Cool communities: Strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, 28: 51–62.

Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Paschall, L., Chopping, M., (2005), Characterizing the urban heat island in current and future climates New Jersey. *Environmental Hazards*, 6, 51-62.

Rubio E., Caselles V., (1997), Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8-14/ m Wave Band: Analysis of Two Field Methods, *REMOTE SENS. ENVIRON.* 59:490-521.

Saaty, T. L., (1980), "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill Book Co., N.Y.

Sailor D.J., (1994), "Sensitivity of coastal meteorology and air quality of urban surface characteristics" Eighth Conference on the applications of air pollution meteorology, Vol 8 American Meteorological Society , Vol 35 ,pp 286-293.

Sailor D.J., (2004), Ecoroofs and the urban climate, in: Proceedings of the Second Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Portland, OR.

Sailor D.J., Nikolaas D., (2007), "The urban heat island Mitigation Impact Screening Tool (MIST)", *Environmental Modeling & Software* 22, 1529-1541.

Saitoh T.S., Shimada T., Hoshi H., (1995), Modeling and simulation of the Tokio urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30: 3431-3442.

Sandholt I., Rasmussen K., Andersen J., (2002), A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 23: 213-224.

Sang J, Liu H, Liu H., (2000), Observational and numerical studies of winter time urban boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87: 243–258.

Sangines D., Turégano J.A., Del Amo A., Agurto A., (2012), Principal component analysis applies to urban remote sensing techniques, 8th International Conference on Urban Climates, Dublin, Ireland.

Sangines D, Turégano JA, Del Amo A., (2012), Urban Heat Island determination using remote sensing techniques and GIS on the impact of energy consumption of buildings, 7th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems, Ohrid, Macedonia.

Santamauris M., (2001), "Energy and climate in the urban built environment", James&James.

Scherer D., Fehrenbach U., Beha H.D., Parlow E., (1999), Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning process, *Atmospheric Environment*, 33: 4185–4193.

Schmugge T., Hook S.J., Coll C., (1998). Recovering surface temperature and emissivity from thermal infrared multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 65: 121_131.

Shimoda Y., Narumi D., Mizuno M., (1999), Estimation and evaluation of artificial waste heat in urban area. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99 WCASP-50 WMO/TD no. 1026.

Simpson J.R., McPherson E.G., (1997), The effects of roof albedo modifications on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona, *Energy and Buildings*, Vol.25, 127-137.

Singh A., Harrison, (1985), Standardised Principal Components, *International Journal of Remote Sensing*.

Snyder W.C., Wan Z., Zhang Y., Feng, (1998), Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*.

Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini, L., (2004), Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90 (4), 434-440.

Stanhill G., Kalma J.D., (1995), Solar dimming and urban heating at Hong Kong. *International Journal of Climatology*, 15: 933–941.

Suckling P.W., (1980), The energy balance microclimate of a suburban lawn. *Journal of Applied Meteorology*, 19: 606– 608.

Taha H., Akbari H., Rosenfeld A., (1991), "Heat island and oasis effect of vegetation canopies: Microclimatological field measurements", *Theoretical Applied Climatology*, Vol 44 ,pp 123.

Taha H., Sailor D., Akbari H., (1992), High albedo materials for reducing cooling energy use, Lawrence Berkeley Laboratory.

Taha H., (1997), "Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat", *Energy and Buildings*, Vol 25, 99-103.

Turégano J.A., (2008), "Energía solar y datos climáticos en Aragón", Universidad de Zaragoza-Gobierno de Aragón, 2da Edición, 23-25.

Turégano J.A., (2013), "Urbanismo energético: La experiencia RENAISSANCE", International Report 6, Anneex 1.2.1_Y7_ZAR_n14_HEATIS, Universidad de Zaragoza.

Urano A., Ichinose T., Hanaki K., (1999), Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,81: 197–210.m

Valor E., Caselles V., (1996), Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Remote Sensing of Environment ,57 (3), 167_184.

Vancutsem C., Ceccato P., (2010), Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature indifferent ecosystems over Africa, Remote Sensing of Environment, 114, 449–465.

VDI, (1997), " VDI-Guideline 3787, Part 1, Environmental Meteorology- Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions". VDI, Beuth Verlag: Berlin.

Voogt J.A., Oke T.R., (1998), Effects of urban surface geometry on remotely sensed surface temperature. International Journal of Remote Sensing 19 (5), 895_920.

Voogt J.A., Oke T.R., (2003), Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of the Environment, 86, 370-384

Voogt J.A., (2007), How Researchers Measure Urban Heat Islands, Department of Geography, London ON Canada.

Ward, J. H. (1963), "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function," Journal of the American Statistical Association, 58, 236–244.

Walton G.N., (1983), "Thermal analysis research program reference manual", NBSSIR 83-2655.

Wukelic G.E., Gibbons D.E., Martucci L, (1989), Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band Remote Sensing of Environment, Vol. 28:339-347.

Yamda T., (2000), Building and terrain effects in a mesoscale model. In: 11th Conference on Air Pollution Meteorology, Long Beach California, New Mexico. 9–14 January 2000, 215–220.