

IDENTIFYING URBAN HEAT ISLAND: THE BARCELONA CASE

Blanca Arellano Ramos

M. Sc. Architect. Assistant professor

blanca.arellano@upc.edu

Josep Roca Cladera

PH. D. Architect. Full professor

josep.roca@upc.edu

Center for Land Policy and Valuation (CPSV)

Department of Architectural Technology (TA)

Technical University of Catalonia (UPC)

Barcelona, 08028, Spain

+ 34 934016396

Key words: UHI, climate change, LST, NDVI, land use, urban sprawl.

Abstract

There is a large consensus that cities have a special role in the process of climate change. Cities are responsible for 75% of global energy consumption and 80% of GHG emissions, both due to "lifestyle" generated in the last 150 years and changes associated with urbanization process in the era of globalization and urban sprawl. The specialized literature has devoted many efforts to analyze the contribution of urban systems to climate change, occupying the Urban Heat Island (UHI) an important place in studies on urban climate. In this sense, the use of remote sensing technology has allowed detailed mapping of (daytime) land surface temperature (LST) for urban and metropolitan systems. These studies have demonstrated the key role played by vegetation, impervious soil and land uses to explain differences in the spatial distribution of LST. However, the information provided by satellites has important limitations: especially the low resolution of the thermal band of night images. MODIS, for example, provides valuable information on the night LST; however, the spatial resolution of the thermal band is about one km², scale clearly insufficient to identify accurately the spatial structure of the UHI. In the opposite site, Landsat offers a more acceptable spatial resolution (30 m² / pixel for the visible bands of the electromagnetic spectrum as well as 60 to 100 m² / pixel in the thermal bands), but does not provide information about night soil temperature. In addition, it is at night when the urban heat island becomes more evident. Therefore, to determine the night LST in an appropriate scale (as offered by Landsat) remains a significant challenge in studies aimed at identifying the spatial structure of the UHI.

In Metropolitan Area of Barcelona (AMB, 3,200 km² and 4.8 million inhabitants), the (day) highest temperatures are not in the CBD but in areas that are more peripheral specialized in economic activity such as industrial parks, producing a "donut" in the spatial distribution of the LST. Bare soil also shows a (day) high surface temperature. In contrast, sprawled areas have a less pronounced LST. The spatial structure of the LST, however, changed significantly during the night: compact and sprawl areas maintain high levels of heat, facing the agricultural soil,

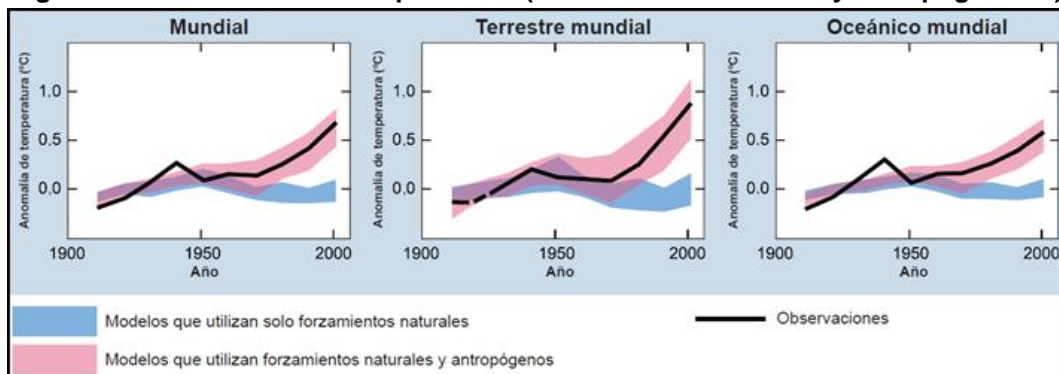
which cools more sharply as also happens in the industrial land. UHI appears therefore overnight.

This paper aims to show the spatial patterns of Urban Heat Island in the Metropolitan Area of Barcelona at medium scale (30 m² / pixel). It develops a new methodology aimed at modeling the night temperature at one km² resolution (MODIS) and then extrapolating this methodology to a most accurate scale of 30 m² / pixel (Landsat). The study allows identifying differences in (night) LST according to the distribution of land use, quantity and quality of the vegetation, intensity of urban sprawl, spatial distribution of economic activity and type of urban morphology (continuous vs. scattered urbanization).

Introducción

“El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar” (IPCC 2007¹, pág. 2). De los 12 años comprendidos entre 1995 y 2006, 11 figuran entre los más cálidos en los registros de temperatura terrestre mundial existentes desde 1850. Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. Las regiones terrestres (fig. n. 1) se han calentado más aprisa que los océanos. La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático. En este sentido, el origen antropogénico de los cambios observados (Trenberth et al., 2007²) parece hoy un hecho igualmente incontrovertible. Las emisiones mundiales de GHG por efecto de actividades humanas han ido en aumento desde la era preindustrial, entre 1970 y 2004 este aumento ha sido del 70%. El resultado de los diferentes modelos de la evolución de las temperaturas de la superficie terrestre, evidencian el protagonismo de los forzamientos de origen antropogénico, respecto a los de carácter natural. Estas tendencias continuarán produciéndose, acelerando incluso, a lo largo del siglo XXI. Los modelos de simulación del clima muestran un elevado nivel de coincidencia respecto a que las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios, con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático. “De proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX” (IPCC 2007, pág. 8).

Figura 1. Evolución de las temperaturas (forzamientos naturales y antropogénicos)



Fuente: IPCC 2007

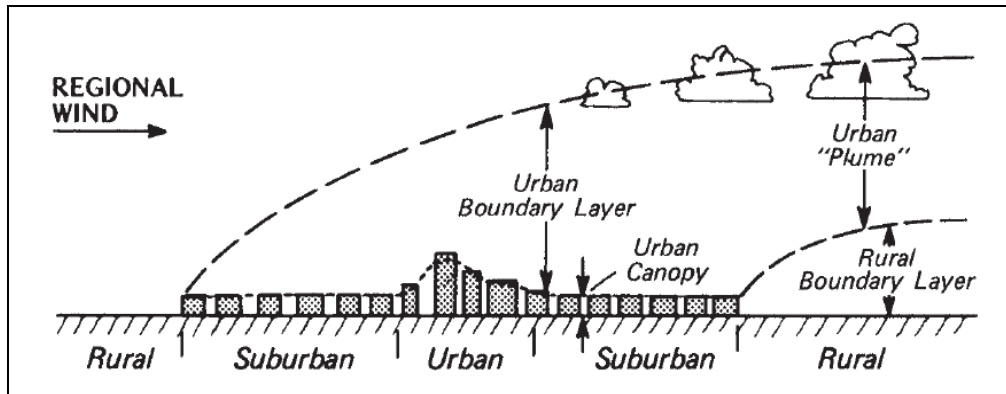
Existe un elevado consenso acerca de que las ciudades tienen un protagonismo especial en este contexto de cambio climático. Según el Centre for Human Settlements (UN-HABITAT) las ciudades son responsables del 75% del consumo global de energía, así como el 80% de las emisiones GEI (<http://www.un.org/press/en/2007/gaef3190.doc.htm>). Con independencia que estos datos estén o no sobredimensionados y de que no exista todavía un protocolo estandarizado para el análisis de la contribución de las ciudades al cambio climático, como sucede en cambio para los países, no cabe duda que el estilo de vida generado a partir de la industrialización y muy particularmente los cambios asociados a la urbanización son elementos determinantes del calentamiento global. Dicha contribución de la urbanización al cambio climático es de doble naturaleza. Por una parte, por la generación urbana de GEI, lo que contribuye de forma determinante al calentamiento global del planeta, y por otra, a la concreta radiación generada por la superficie del suelo urbanizado, la cual determina un flujo de calor sensible y latente en virtud del tipo de cubiertas urbanas, así como a su grado de humedad.

A pesar de que el clima de las ciudades depende fundamentalmente de factores de carácter regional, como la latitud, el relieve o la distancia a las masas de agua, también es afectado por factores locales y de micro-escala, como las características de la estructura urbana, la topografía y superficie de las cubiertas de suelo, la vegetación o el calor antropogénico generado por el metabolismo urbano (Lowry, 1977³; Oke, 1973⁴). Existen diferencias significativas en el clima de las áreas urbanas comparadas con las de carácter rural (Oke, 1987⁵). El efecto de la isla de calor urbana (UHI) describe la influencia de las superficies urbanas en los patrones de temperatura de las áreas urbanas en contraposición a las áreas circundantes. Los materiales artificiales (especialmente el asfalto y hormigón) usados usualmente en las áreas urbanizadas son una de las principales causas. Aparte de las zonas áridas y semiáridas, la UHI muestra temperaturas más altas en las zonas urbanas que en las zonas rurales y depende de diversos factores, como la latitud, la altitud, la topografía, el tamaño de la ciudad y la estabilidad atmosférica.

La acumulación de calor en las ciudades no sólo afecta a los entornos urbanos, sino que también tiene efectos a escala local e incluso global: la isla de calor urbana (UHI) se encuentra estrechamente vinculada con el cambio climático general (Roth et al, 1989⁶). Cambiando los usos permeables y húmedos, característicos del espacio rural, por los secos e impermeabilizados propios de pavimentación y edificación de las áreas urbanas se afecta de forma acusada el balance energético y la temperatura del suelo (Guo et al., 2012) así como muchas otras propiedades como la evapotranspiración, la infiltración de agua en la superficie, el sistema de drenaje, entre otros factores, que afectan al clima y al conjunto de ecosistemas.

Los efectos de la UHI se manifiestan en diferentes escalas. Pueden distinguirse dos tipos de UHI: la "canopy layer heat island" y la "boundary level heat island" (fig. n. 2). La primera depende de la rugosidad del suelo generada por los edificios y la copa de los árboles, con un límite superior situado justo por encima del nivel de las cubiertas de los edificios. En esta capa, el flujo del aire y los intercambios de energía vienen gobernados por procesos de microescala que dependen de las características específicas de la superficie. La segunda se sitúa por encima de la primera, con un límite inferior sujeto a la influencia de la superficie urbana. En la capa límite urbana, que es la parte de la capa límite atmosférica por encima del nivel de los edificios cuyas características están afectadas por la presencia de la urbe, la UHI opera de forma distinta, tratándose de un fenómeno de escala local a mesoescala, controlado por procesos que operan a mayor escala espacial y temporal.

Figura 2. Urban Canopy & Urban Boundary Layers



Fuente: Oke (1987)

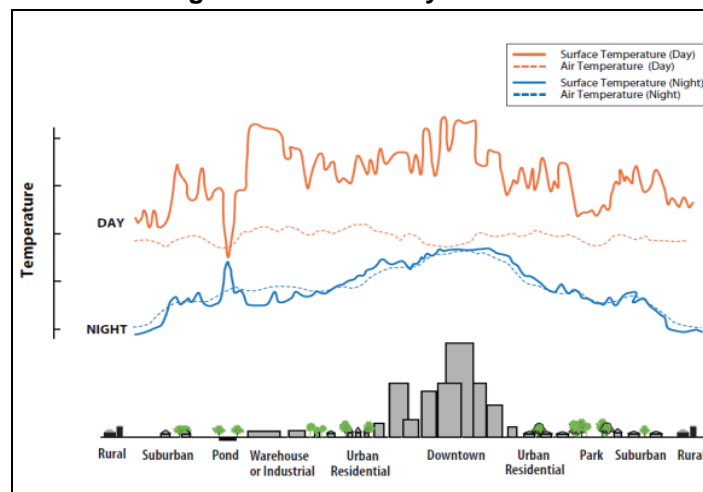
La *temperatura de la superficie terrestre (LST)* ocupa un papel fundamental en la generación de la UHI, al representar un factor determinante de la radiación de la superficie y el intercambio de energía (Weng, 2009⁸), además del control de la distribución de calor entre la superficie y la atmósfera (Oke, 2006). En resumen, la LST regula el ambiente térmico urbano. Por ello, es necesario el modelado y predicción de los cambios ambientales así como el análisis y la comprensión de la dinámica de la LST y su relación con los cambios de origen antropogénico. La LST sirve como un indicador importante de los procesos físicos, químicos y biológicos del ecosistema y está influenciada, junto a la latitud y tipo de clima, por variables de tipo geográfico, como la elevación, orientación y pendiente, entre otros muchos factores que condicionan la incidencia de la radiación solar en la superficie terrestre, junto a las propiedades de las cubiertas y usos de suelo, como son el color, la rugosidad de la superficie, la humedad, el material, etc. La temperatura de la superficie terrestre regula las capas bajas de la atmósfera. Por lo tanto, se la puede identificar como una variable climática clave y factor crítico para el medio ambiente urbano, dado que la LST modula el equilibrio de la energía (Tan et al., 2009).

La *composición de las cubiertas de suelo* es uno de los principales factores que influyen en la LST, en particular el porcentaje de cada tipo de cobertura terrestre que ocupa el área urbanizada. El área construida, asimismo, puede tener un impacto especialmente alto (Zhou et al. 2011). La temperatura de la superficie terrestre tiene, por lo general, una correlación positiva con la superficie impermeable de carácter urbano y negativa con la ocupada por bosques y zonas con vegetación. La disminución de vegetación influye en los saldos de calor, lo que lleva a un aumento de LST, al mismo tiempo, la precipitación y la evapotranspiración tiene la tendencia opuesta. En la literatura especializada está especialmente bien documentada la relación existente entre la LST con las cubiertas verdes y el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). El NDVI, junto a otros indicadores de vegetación, ha sido ampliamente usado como un indicador de la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, así como del impacto en la misma de la urbanización. Los trabajos que han analizado la relación NDVI-LST muestran, por lo general, una correlación negativa entre ambas variables. De igual manera se ha demostrado la existencia de una relación positiva entre la superficie impermeabilizada (impervious surface) con la LST. Por su parte, otras investigaciones han demostrado la correlación positiva existente entre la LST con distintos indicadores de intensidad de la edificación, como por ejemplo el NDBI (Normalized Difference Built-up Index), lo que representa que la isla de calor urbana es más alta en las áreas edificadas respecto a las no

edificadas; dicha variable, han indicado diversos autores, es más esTabla que el NDVI, al no depender de forma acusada de la estación del año, así como por tener una relación más abiertamente lineal con la LST que el índice de vegetación (Li & Liu, 2008). Asimismo, se ha demostrado como la LST está relacionada no sólo con el tipo de vegetación sino también con la humedad del suelo y la densidad demográfica. Aplicando técnicas de teledetección (*remote sensing, RS*), Weng (2001¹³) analizó la expansión urbana y sus impactos en la LST, obteniendo que la expansión urbana causaba el crecimiento de la LST en 13.01 K.

El acceso al RS ha hecho posible el estudio generalizado de la LST y, en consecuencia, de la UHI a escala local y regional. Sin embargo la gran mayoría de los trabajos se ha limitado a esTablacer la temperatura de suelo de día, puesto que los sensores satelitales de mayor resolución (Landsat, por ejemplo), devuelven tan sólo información del espectro electromagnético diurno. Sin embargo la UHI es un fenómeno principalmente nocturno (ver figura n. 3), lo que sugiere la necesidad de incorporar otros sensores operacionales que ofrezcan información de la banda térmica nocturna, como MODIS. El gran problema, sin embargo, es que éstos tienen un nivel de resolución mucho más bajo, ofreciendo una imagen poco detallada de la isla de calor urbana.

Figura 3. UHI diurna y nocturna



Fuente: US Environmental Protection Agency (2008)

Por otra parte, *el planeamiento urbano tiene una transcendencia fundamental para informar, coordinar e implementar medidas para mejorar la calidad climática de las ciudades frente al cambio climático global* (Alcofrado & Matzerakis, 2010). Sin embargo, no parece existir una sensibilización al respecto, siendo escasas las iniciativas para adaptarlo por tal de aumentar la resiliencia urbana al cambio climático. En este sentido la reflexión permanece todavía en el campo teórico, no habiendo descendido a la arena de la práctica de la planificación. A pesar de la abundancia de estudios científicos producidos a lo largo de las últimas décadas acerca de los efectos de la urbanización en el clima, así como de los demostrados perversos resultados que en la salud y en la calidad de vida de las personas generan los eventos extremos resultado del cambio climático, el planeamiento territorial y urbano aún no parece haberse adaptado al mismo (Arellano & Roca, 2015).

La presente ponencia tiene por objeto modelar la UHI del Área Metropolitana de Barcelona (AMB, 3,200 km², 4,8 millones de habitantes) a una escala intermedia, equivalente a unos 30-100 m²/píxel, mediante la utilización cruzada de las imágenes satelitales de MODIS y Landsat, con el fin de una herramienta adicional para la toma de decisiones en el diseño y planeamiento de la ciudad.

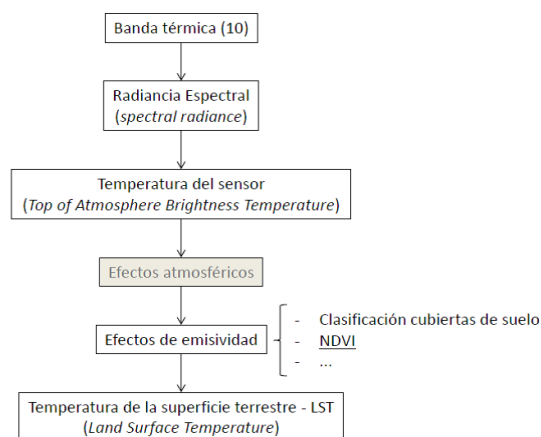
Metodología

Las imágenes satelitales que se utilizarán son MODIS, (por medio de su sensor Advanced Spaceborne Thermal mission and Reflection - ASTER) y Landsat-8 (con sus sensores OLI - Operational Land Imager y TIRS - Thermal Infrared Sensor). El primero con una resolución (diurna y nocturna) de 1 km²/píxel, y el segundo (sólo diurna) con 30 m²/píxel para el sensor multi-espectral OLI y 100 m²/píxel para las bandas térmicas. Las imágenes analizadas corresponden a la época de inicios del otoño (octubre).

La obtención de la UHI del Área Metropolitana de Barcelona se llevará a cabo por medio de la siguiente metodología:

1. En primer lugar se obtendrá la *LST de día* por medio de Landsat (OLI & TIRS), con una escala de resolución de 30-100 m²/píxel. Dicha LST permite determinar el tipo de cubiertas de suelo que radian mayor temperatura diurna, permitiendo verificar la hipótesis de que la artificialización elevada del suelo contribuye de forma positiva a la generación de la UHI. La metodología que se emplea para obtener la LST consiste en convertir la codificación numérica (Digital Number-DN) de la banda térmica (infrared thermal) en que se facilitan las imágenes satelitales en unidades físicas. Para ello: a) se transforma el DN en radiación espectral (spectral radiance); b) se calcula la temperatura de luminosidad en el sensor (at-sensor brightness temperatura). Esta temperatura no tiene en cuenta el tipo de material o de suelo que emite la energía captada, por tanto equivaldría a la temperatura emitida por un cuerpo negro (black body); y c) lo anterior conlleva a realizar una última corrección del valor obtenido introduciendo la emisividad (emissivity) de los materiales del suelo, a partir, por ejemplo, del índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o el NDBI (Normalized Difference Building Index). La figura n. 4 reproduce el proceso seguido.

Figura 4. Metodología para la obtención de la LST

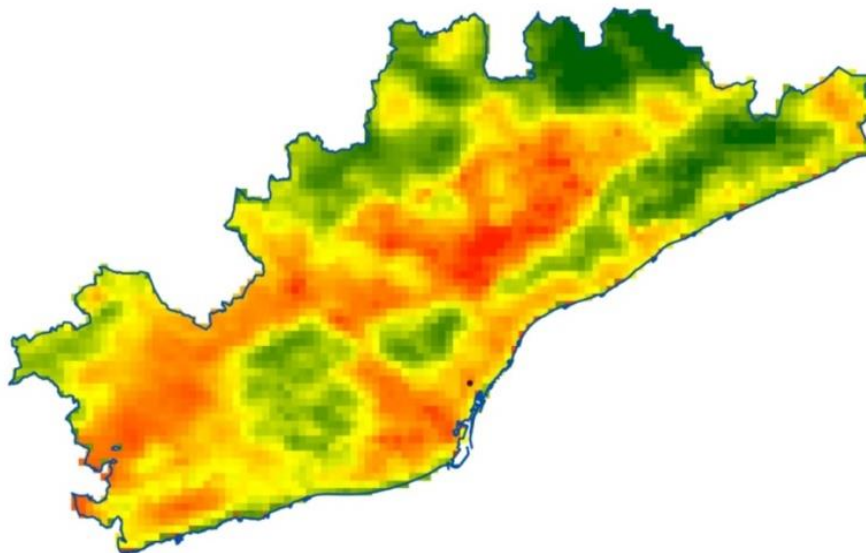


2. Mediante un procedimiento similar al descrito en el punto anterior, se obtienen las *temperaturas de suelo de día y noche* por medio de MODIS (ASTER), con una escala de resolución de *1 km²/píxel*. La obtención de la LST diurna y nocturna permite verificar la hipótesis de que son los usos urbanos más intensos los que atesoran de noche una mayor cantidad de calor, contribuyendo de forma determinante a la generación de la UHI.
3. Finalmente se ensaya un proceso de conversión de la temperatura de noche obtenida a baja resolución (1 km²) a alta resolución (30-100 m²/píxel) por medio de la construcción de un modelo explicativo (OLS). Dicho modelo, generado a partir de la información asociada a la escala de la imagen de MODIS, se aplica a la escala pormenorizada de Landsat, lo que permite comprender con un grado de verosimilitud razonable el proceso de enfriamiento nocturno de las distintas cubiertas de suelo, verificando la existencia de la UHI del caso estudiado.

Resultados

El análisis de las imágenes ofrecidas por Landsat y MODIS permite la obtención, por medio de la metodología desarrollada en el epígrafe precedente, de las temperaturas diurnas de suelo del Área Metropolitana de Barcelona (así como de las temperaturas nocturnas, en el caso de específico de MODIS). Las figuras n. 5 y 6 muestran las LST diurnas obtenidas mediante las bandas térmicas de los citados satélites. Como se puede observar, ambas imágenes muestran un patrón parecido, existiendo una correlación entre ambas LST relativamente elevada ($R^2 = 0,727$, figura n.7)¹.

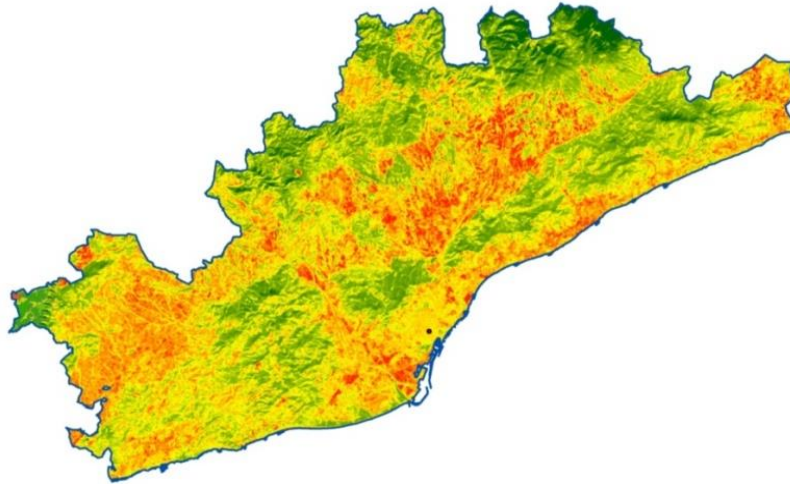
Figura 5. LST diurna (MODIS, 1 km de resolución)



Fuente: MODIS. Elaboración propia

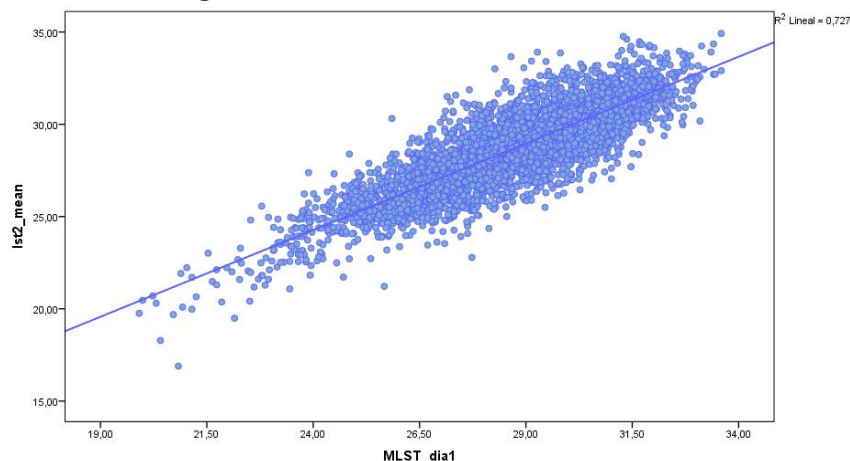
¹ La obtención de la R^2 citada se refiere a la LST de los 3,759 píxeles contenidos en la imagen de MODIS en relación a la LST media obtenida para esos mismo píxeles a partir de Landsat.

Figura 6. LST diurna (Landsat, resolución 30 m)



Fuente: Landsat. Elaboración propia

Figura n. 7 LST MODIS vs. LST Landsat



Fuente: MODIS, Landsat. Elaboración propia

El análisis realizado confirma la existencia de la isla de calor urbana en el Área Metropolitana de Barcelona. El suelo artificializado, según Corine Land Cover (CLC), alcanza mediante el análisis de la imagen MODIS una temperatura media diaria de 29,7 °C, mientras que el suelo no artificializado 28,3 °C. Dichos resultados son similares según la LST obtenida a partir de Landsat (30,1 vs. 28,2 °C).

Sin embargo, las temperaturas de día vienen parcialmente sesgadas por el sobrecalentamiento de los suelos agrícolas, parcialmente desnudos en la época otoñal². La tabla n. 1 muestra para las principales cubiertas de CLC de las temperaturas diurnas de MODIS y Landsat, junto a alguno de los principales indicadores utilizados.

² En otoño, una parte importante del suelo agrícola pierde, para la latitud del Área Metropolitana de Barcelona, cuotas significativas de vegetación. Es el caso, especialmente, de la viña, una vez producida la recolección de la uva, así como del cereal. El suelo, "desnudo", acumula importantes cantidades de calor durante las horas de insolación diurna, presentando una imagen térmica muy distinta de la imaginada en las representaciones clásicas de la isla de calor urbana.

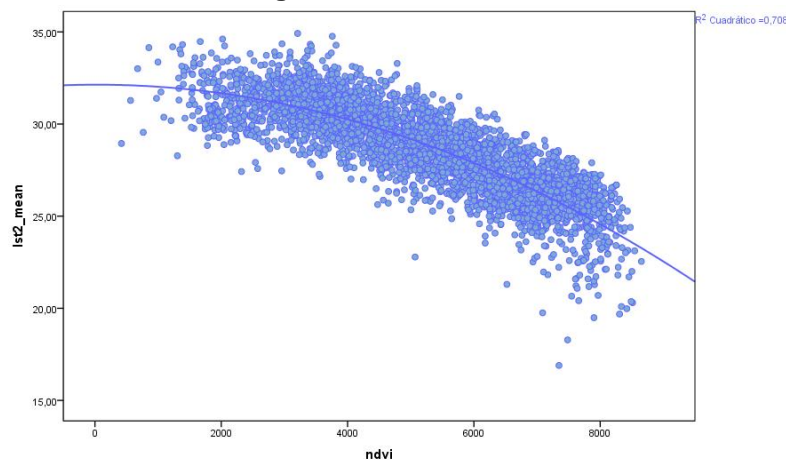
Tabla 1. LST para distintas cubiertas de suelo

Corine	NDVI	NDBI	Emisividad	LST Landsat	LST MODIS
Compacto	0,173103	0,208387	0,888741	30,4517	30,3514
Disperso	0,331724	0,106548	0,953275	28,8689	28,8026
Industrial	0,149585	0,195983	0,869183	32,3301	31,2106
Otros Usos Urbanos	0,226186	0,173915	0,890682	30,0831	29,716
Agrícola	0,315412	0,168982	0,947661	30,6329	30,0684
Forestal	0,509443	-0,055711	0,975901	26,1898	26,934
Otros Usos Rurales	0,422224	0,050236	0,968013	28,1666	28,3466

Fuente: MODIS, Landsat. Elaboración propia

El uso industrial junto al residencial compacto alcanzan las temperaturas de día más elevadas. De forma opuesta, el uso residencial disperso, relativo a las áreas caracterizadas por sprawl, observan una LST mucho más suave. En este sentido se confirma una correlación claramente negativa entre el NDVI y la LST, contribuyendo el grado y la calidad de la vegetación a la suavización temperaturas diurnas. Efecto beneficioso de la vegetación que queda plenamente confirmado tanto en el suelo forestal como en el resto del suelo rural (otros usos del suelo distintos del suelo agrícola y forestal), que son las cubiertas con menor temperatura de las observadas en el caso de estudio. La figura n. 8 muestra esta elevada correlación entre el NDVI y la LST ($R^2 = 0,708$)³.

Figura 8. LST vs. NDVI



Fuente: Landsat, MODIS. Elaboración propia

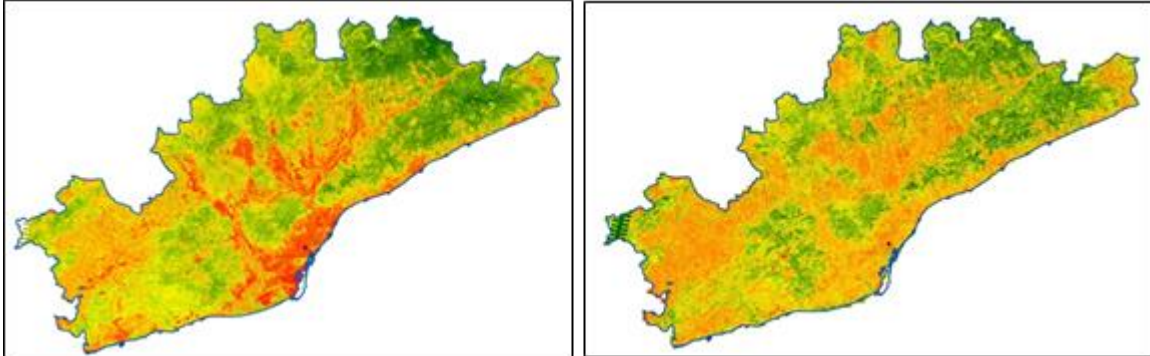
La elevada temperatura del suelo agrícola, con un NDVI parecido al suelo residencial disperso pero acusadamente más caliente, no permite sostener, para la época estacional de las imágenes, la existencia de una clara y definitiva UHI diurna⁴. Al “donut” generado por la LST del suelo industrial, más periférico, se le añade el caliente suelo rural ocupado por la agricultura.

³ La figura muestra la LST media de Landsat obtenida por píxel de 1 km (MODIS) vs. el NDVI suministrado por MODIS. En caso de utilizar la LST de día de MODIS, como variable dependiente, la R^2 alcanzada (por medio de un modelo cuadrático) es 0,660.

⁴ El hecho de haber utilizado una única imagen, relativa a la época otoñal, dificulta el entendimiento de la UHI diurna. Un refinamiento posterior al trabajo que aquí se presenta debería incluir las imágenes de primavera, verano e invierno.

Por su parte, la utilización del NDBI no permite resolver el problema de discriminar el efecto de los suelos desnudos en la LST. Como se puede deducir tanto de la tabla n. 1 como de la figura n. 9 los suelos agrícolas obtienen, por lo general, un elevado NDBI.

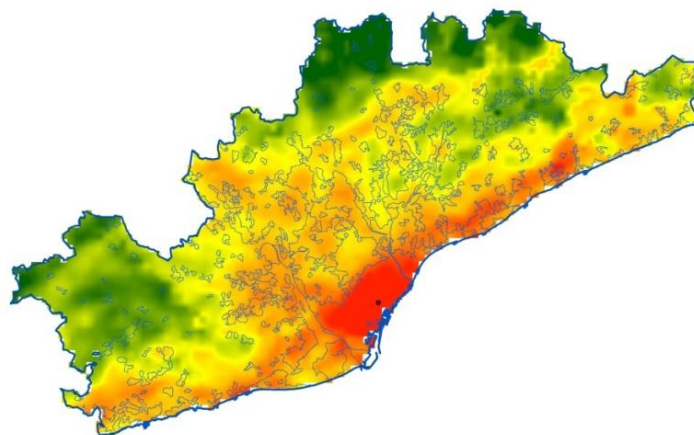
Figura 9. NDVI vs. NDBI



Fuente: Landsat. Elaboración propia

La LST nocturna, en cambio, ofrece una imagen mucho más nítida de la UHI metropolitana de Barcelona (figura n. 10). Los valores máximos de la LST noche aparecen, por lo general, asociados a las zonas de mayor artificialización, en especial Barcelona ciudad y su continuo urbano, que alcanza las temperaturas nocturnas más elevadas. También la línea litoral, con una mayor proporción de suelo urbanizado, o los enclaves altamente artificializados del Vallés, muestran una temperatura más acusada. No obstante, la temperatura nocturna dista de mostrar una relación lineal con el grado de urbanización. Otros factores como la cercanía al mar, o la altitud determinan también la LST de noche. Especialmente determinante es el efecto marítimo, que en la época del año analizada (inicio del otoño) mantiene elevadas temperaturas en la costa, provocada por la acusada inercia térmica del mar.

Figura 10. LST nocturna (MODIS, 1 km de resolución)



Fuente: MODIS. Elaboración propia

Sin embargo, y a pesar de que los factores geográficos condicionan de manera acusada la temperatura nocturna, emerge una clara isla de calor de origen intrínsecamente urbano. *El suelo artificializado tiene, de media, más de un grado de diferencia respecto al suelo no*

artificializado (16,67 frente a 15,39 °C). Como muestra la tabla n. 2, el suelo residencial compacto, el residencial disperso así como el resto de cubiertas urbanas y el suelo forestal denotan una mayor inercia térmica, con reducciones de temperatura entre la noche y el día inferiores a los 13 grados. Frente a los anteriores, el suelo industrial y, sobre todo, el suelo agrícola, observan reducciones mucho más acentuadas (con más de 14 e incluso 15 grados Celsius). La UHI emerge con toda claridad: aun con la reducción de la LST industrial, todas las categorías de cubiertas de suelo urbanizadas alcanzan temperaturas nocturnas superiores a las cubiertas rurales. Es de destacar, en este sentido, la elevada temperatura nocturna del suelo residencial disperso, característico del urban sprawl, a diferencia de su más moderada LST diurna.

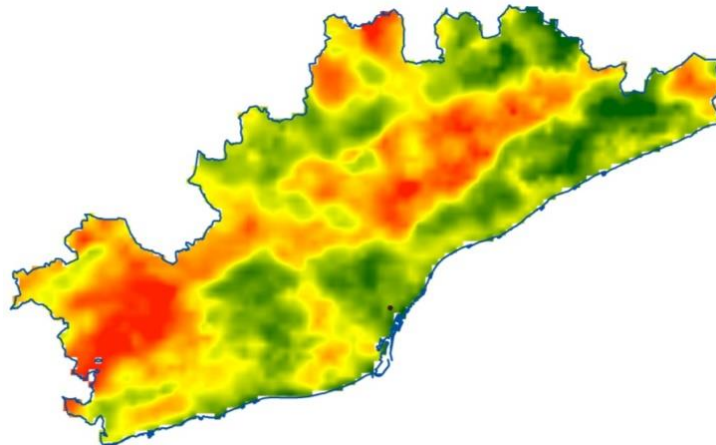
Tabla 2. Diferencias de LST diurnas y nocturnas

Corine	LST (día)	LST (noche)	Diferencia
Compacto	30,3514	17,62809	12,72331
Disperso	28,8026	16,17281	12,62979
Industrial	31,2106	16,51994	14,69066
Otros Usos Urbanos	29,716	17,05805	12,65795
Agrícola	30,0684	15,06178	15,00662
Forestal	26,934	15,23426	11,69974
Otros Usos Rurales	28,3466	15,32152	13,02508

Fuente: MODIS. Elaboración propia

Por su parte la figura n. 11 muestra la diferencia de temperatura entre el día y la noche según MODIS. Puede observarse que las zonas más centrales y urbanizadas (especialmente el continuo urbano de Barcelona) así como las cubiertas de suelo forestal tienden a tener un menor enfriamiento nocturno (color verde), a diferencia de las áreas agrícolas (mayormente desnudas) e industriales, cuyo enfriamiento es más acusado (gama de rojos). No obstante, también intervienen de forma significativa factores de orden geográfico, como la cercanía al mar. En este sentido se contraponen la depresión y cordillera litoral (con menor enfriamiento) a la depresión pre-litoral (con diferencias de temperatura día/noche más pronunciadas).

Figura 11. Diferencia entre la LST de día y de noche (MODIS, 1km de resolución)



Fuente: MODIS. Elaboración propia

A fin de explicar la variación de la LST nocturna suministrada por MODIS se ha ensayado un modelo OLS. La tabla n. 3 presenta los resultados. El modelo, a pesar de obtener un modesto nivel explicativo ($R^2 = 0,58$), limitado por la exclusiva inclusión de variables explicativas que pudiesen más adelante ser aplicadas a la escala de resolución de Landsat⁵, permite comprender los factores explicativos de la formación y distribución espacial de la LST. Los factores geográficos participan de forma significativa en el modelo, como por ejemplo la altura respecto al nivel del mar ("DTM"), la distancia a la costa ("Dist_costa"), la orientación ("orientació") o la pendiente ("pendent"). El NDVI ("mndivi" y "mndivi_corine") confirma su contribución suavizadora de la LST. Igualmente, se confirma la importante significación de las cubiertas de suelo ("corine_rec"), segmentadas en virtud a las cubiertas de CLC ("MLST_dia1_corine"), así como por la distancia al mar ("MLST_dia1_corones_corine_rec"). Estas últimas variables, unido a la contribución negativa de la distancia al centro metropolitano ("Dist_Centre"), ratifican la existencia de la UHI nocturna en la AMB.

Tabla 3. Modelo OLS de la LST nocturna

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,763 ^a	,583	,582	1,08252

a. Variables predictoras: (Constante), mndivi_corine, Orientació, Dist_costa, Dist_Centre, Pendent, Corine_rec, MLST_dia1, DTM, MLST_dia1_corones_corine_rec, mndivi, MLST_dia1_corine
b. Variable dependiente: mlst_nit1

Coefficientes^a

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados		t	Sig.
	B	Error típ.	Beta			
1 (Constante)	40,4457015672	1,399			28,913	,000
Dist_costa	-,0000502338	,000	-,297		-18,944	,000
Dist_Centre	-,0000161871	,000	-,124		-11,051	,000
DTM	-,0039855700	,000	-,543		-26,592	,000
Orientació	-,0004865825	,000	-,029		-2,699	,007
Pendent	,0165971210	,001	,191		13,963	,000
Corine_rec	-,1309106575	,017	-,136		-7,691	,000
MLST_dia1	-,1034591827	,018	-,137		-5,908	,000
mndivi	-,10638771573	,241	-,107		-4,417	,000
MLST_dia1_corine	-,2923398718	,041	-,275		-7,073	,000
MLST_dia1_corones_corine_rec	-,2769668444	,026	-,261		-10,838	,000
mndivi_corine	-4,4747101596	,577	-,376		-7,757	,000

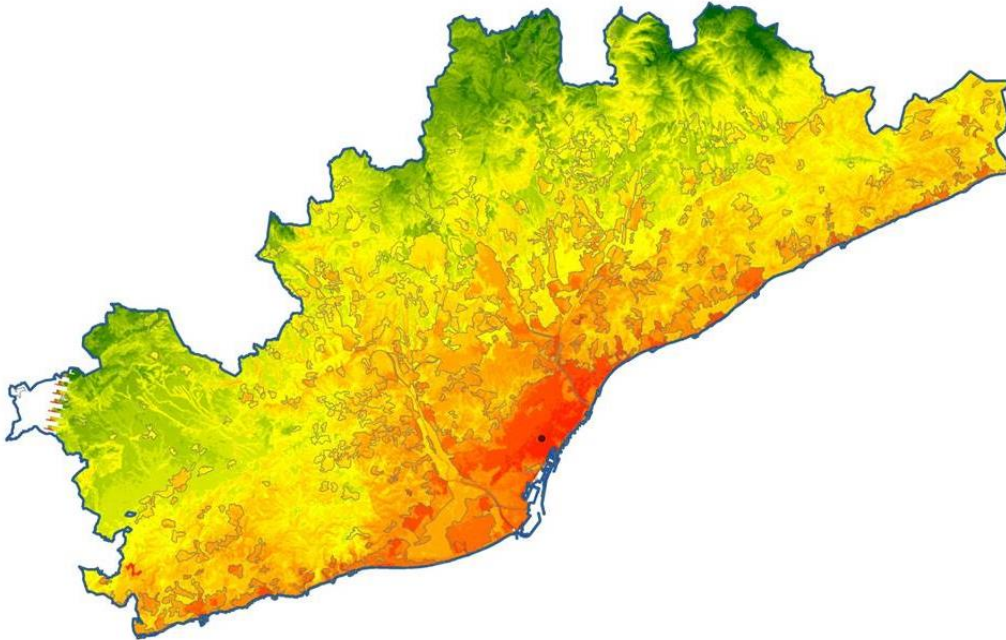
a. Variable dependiente: mlst_nit1

Fuente: MODIS. Elaboración propia

La aplicación del modelo anterior a la escala de resolución de Landsat (30-10 m²/píxel) permite visualizar con un mayor grado de precisión la LST nocturna del Área Metropolitana de Barcelona. La figura n. 12 representa la imagen del modelo OLS anteriormente expuesto, adaptada a la escala de resolución de Landsat. La superposición de la LST con los contornos urbanizados obtenidos por medio de CLC evidencia la existencia de una marcada UHI en la AMB y para la época estacional analizada.

⁵ El ensayo de un modelo OLS con variables "nocturnas" en vez de "diurnas" es acusadamente más explicativo de la variación espacial de la LST, del orden de un 70%. Sin embargo, como se ha indicado más arriba, el objetivo del modelo consiste en replicar la distribución espacial de la LST nocturna con la información proveniente de Landsat, y de esta manera alcanzar una resolución más detallada.

Figura 12. LST nocturna a 30-100 m/píxel



Fuente: MODIS, Landsat, CLC. Elaboración propia

Conclusiones

La realización del estudio que aquí se presenta confirma la existencia de una clara Isla de Calor Urbana en el Área Metropolitana de Barcelona. Tanto la información resultante de Landsat (día) como de MODIS (día y noche) confirma una mayor concentración de calor en las superficies artificiales resultantes de la urbanización respecto las de carácter rural. El análisis de la imagen térmica nocturna, así como de la diferencia día/noche ratifica la hipótesis de que es especialmente durante la noche cuando emerge la UHI. Sin embargo la LST nocturna tan sólo ha podido ser obtenida a baja resolución (1 km²/píxel), lo que presenta una imagen excesivamente poco detallada de la isla de calor de Barcelona. Por ese motivo se ha ensayado un modelo para trasladar la estructura de la LST nocturna obtenida mediante MODIS a una mayor resolución, de 30-100 m²/píxel, equivalente a la resultante del satélite Landsat. La comparación entre ambas imágenes de elevada resolución, diurna y nocturna, evidencia con toda rotundidad la existencia de una acusada UHI en el Área Metropolitana de Barcelona.

Los resultados obtenidos sugieren que la UHI puede ser modelada, a pesar de las limitaciones de información sobre LST nocturna. Es importante destacar la importancia de este tipo de estudios con el fin de introducirlos en la práctica de la planificación urbana y territorial por tal de poder anticipar los efectos climáticos de la misma y permitir, en consecuencia, incrementar la resiliencia de los sistemas urbanos al cambio en el clima.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Montserrat Moix, Licenciada en Informática e investigadora del Centro de Política de Suelo y Valoraciones, su contribución a este artículo, especialmente la revisión de la metodología para la obtención de la LST. Asimismo, resaltar que este primer artículo forma parte del proyecto nacional de investigación "Urban-CLIMPLAN. La isla de calor urbana: efectos en el cambio climático y modelado para estrategias de planeamiento territorial y urbano. Aplicación a la Región Metropolitana de Barcelona", financiado por MINECO y FEDER.

Bibliografía

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York, 2007, pág. 2

Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling D, Klein Tank A, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Soden B, Zhai P. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change. In Climate Change 2007: The Physics Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds). Cambridge University Press: Cambridge, New York. IPCC 2007, pág.8

Lowry, W.P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 129-135.

Oke, T.R. (1973): City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, Pergamon Press 1973, vol.7, 769-779.

Oke, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates*. Second edition 1987. Taylor & Francis.

Roth M., Oke T. R., Emery W. J. (1989): Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, Iss. 11, 1989

Guo, Z. Wang, S.D., Chengc, M.M. & Shu, Y. (2012): Assess the effect of different degrees of urbanization on land surface temperature using remote sensing images. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 935-942.

Weng Q., (2009): Thermal Infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 64, Issue 4, July 2009, Pages 335-344.

Oke TR. 2006. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 84: 179–190. Volume 64, Issue 4, July 2009, Pages 335-344.

Tan K. C., Lim H. S., MatJafri M. Z., Abdullah K., (2010): Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use/land cover changes in Penang Island, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 60, Iss. 7, 2010.

Zhou W., Huang G., Cadenasso M. L., (2011): Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, Volume 102, Issue 1, 30 July 2011, Pages 54-63.

Li, J. & Liu, Q. (2008): Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery. International Conference on Earth Observation Data

Processing and Analysis (ICEODPA), edited by Deren Li, Jianya Gong, Huayi Wu, Proc. of SPIE Vol. 7285, 728503.

Weng Q., (2001): A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, Vol.22 (10), pp.1999-2014

Alcoforado & Matzerakis, 2010. Planning with Urban Climate in Different Climatic Zones. *Geographicalia*, 57: 5-39.

Arellano, B. & Roca, J., 2015. Planificación Urbana y Cambio Climático. *Proceedings of International Conference of Regional Science. XLI Reunión de Estudios Regionales AECR*. Reus, 2015.