

Trabajo de Fin de Grado en Física

Estudio del efecto isla de calor urbana con datos de satélite (MODIS)

JULIO del 2020

Alumno/a: Javier Porcel Marí

Tutor/a (1): José A. Sobrino Rodríguez

Tutor/a (2): Guillem Soria Barrés

Abstract / Resumen

This document covers an experimental procedure that tries to analyse the impact of different Spanish cities (Madrid, Valencia and Zaragoza) in their environment and ,more specifically, in the way they increase their temperature respect their surroundings accumulating heat, creating what it is known as the Urban Heat Island Effect. We will also contrast how this phenomenon appears in different years in order to detail if this effect is becoming stronger or weaker. To achieve this goal it will be necessary to use some processed nocturne images from heat episodes extracted from the imaging sensor MODIS, which is on board the AQUA Satellite since 2002. After getting this images and extracting the data that it is needed, we will have evidences of how this phenomenon is evolving in time and which characteristics are increasing or decreasing it.

Este documento aborda un procedimiento experimental que trata de analizar el impacto de diferentes ciudades españolas (Madrid, Valencia y Zaragoza) en el medio ambiente y, más específicamente, en el modo en que estas ciudades incrementan su temperatura respecto a su entorno acumulando calor en lo que se conoce como Efecto de Isla de Calor Urbano. También contrastaremos como este fenómeno aparece en diferentes años a fin de detalla si este efecto se va volviendo más fuerte o más débil. Para alcanzar esta meta será necesario usar varias imágenes nocturnas procesadas de episodios de calor extraídas del sensor de imágenes MODIS, que se encuentra a bordo del satélite AQUA desde el año 2002. Después de obtener las imágenes y extraer la información que se requiere para proceder, tendremos evidencias de cómo este fenómeno evoluciona en el tiempo y de qué características lo hacen crecer y decrecer.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 4 |
| 1.1 Fundamentos generales | |
| 1.2 Obtención de datos y ciudades seleccionadas | |
| 2. Metodología experimental | 5 |
| 2.1 Características propias y Mapa LST | |
| 2.2 Índice SUHI | |
| 2.3 Índice DI | |
| 3. Resultados y discusión | 9 |
| 3.1 Madrid | |
| 3.2 Valencia | |
| 3.3 Zaragoza | |
| 3.4 Comparativa del efecto SUHI entre las ciudades estudiadas | |
| 4. Conclusiones | 21 |
| 5. Bibliografía | 21 |

1. Introducció

1.1 Fundamentos generales

Como bien se explica en el resumen, en este trabajo se analizará desde un punto de vista experimental el Efecto Isla de Calor Urbano y su evolución temporal en distintas ciudades españolas. Este efecto consiste en que las ciudades absorben y retienen el calor en mayor medida que su entorno rural resultando en temperaturas más elevadas [1][2][3]. Esto se debe a la reflectividad de los diferentes materiales de construcción que componen las diferentes infraestructuras y edificios típicos de un entorno urbano como el hormigón, además de la propia actividad humana, por ejemplo, en el calor que desprenden los vehículos o en máquinas térmicas bien para uso doméstico o para uso industrial [4].

Resulta de gran importancia el estudio de este fenómeno ya que afecta de gran manera al bienestar de las personas que residen en grandes urbes ya que temperaturas muy elevadas ya no es que pueden resultar molestas sino que además pueden dificultar el descanso nocturno [5]. Además este tipo de fenómenos afectan cada vez más a una mayor porción de la población mundial pues el éxodo rural se acentúa cada vez más en la actualidad [6].

Además, acaba siendo muy provechoso analizar que ciudades, o incluso que distritos, sufren más de este tipo de efectos para poder combatirlos mediante una buena planificación urbanística que trate de amortiguarlos mediante la construcción de diferentes infraestructuras, como parques y zonas verdes por ejemplo [7].

1.2 Obtención de datos y ciudades seleccionadas

Para obtener la información que tratamos de conseguir, utilizaremos imágenes nocturnas procesadas provenientes de episodios de calor que son extraídas por el sensor de imágenes MODIS que se encuentra a bordo del satélite AQUA, como hemos dicho anteriormente, desde el año 2002. Más concretamente usaremos el producto MYD21 que nos proporciona directamente un mapa de temperaturas de la zona a estudiar con una resolución de 1 Km.

Todas las imágenes que se utilizan en este trabajo se han descargado desde la página web de la NASA con el buscador Earth Data (<https://earthdata.nasa.gov/>). Para tratar estas imágenes se hará uso del software ENVI, que tiene una interfaz muy sofisticada y que resulta muy apropiada para el tratamiento de imágenes procedentes del sensor MODIS.

Respecto a las ciudades que se estudian en este trabajo, se han seleccionado tres ciudades españolas que sufrieron dos episodios intensos de calor, el primero aconteció la segunda semana de Julio del 2004 y el segundo episodio aconteció la cuarta semana de Julio del 2019. Estas ciudades son: Madrid, Valencia y Zaragoza,

las cuales aparecen en la Figura 1, que corresponde a un mapa nacional por tal de visualizar también los motivos geográficos de esta selección.

En el mapa se observa que cada una de las ciudades tiene una lejanía respecto a la costa totalmente diferente lo que además conlleva una altitud respecto del mar completamente distinta. Si se hace hincapié en aspectos demográficos también se detalla que analizaremos una ciudad muy poblada como es Madrid y otras dos ciudades de tamaños medios como Valencia y Zaragoza.



Figura 1. Mapa político nacional donde se halla con facilidad la ubicación de las ciudades seleccionadas.

2. Metodología experimental

2.1 Características propias y Mapa LST

Antes de proceder a analizar cada ciudad en el apartado de Resultados se hace una pequeña recopilación de las características propias de la urbe en cuestión, es decir, datos geográficos y demográficos, que nos servirán como guía cualitativa para buscar explicación a los resultados cuantitativos que obtengamos de analizar con distintos índices el contraste de temperaturas que hallemos en cada una de las ciudades seleccionadas.

Además se enseña un primer mapa de temperaturas sin aplicar índice alguno para mostrar de una manera muy visual que efectivamente, la temperatura que se calcula para cualquier parte del casco urbano es superior a las temperaturas que se calculan para el entorno rural de la ciudad.

2.3 Índice SUHI

El primer índice que se utiliza corresponde al índice SUHI, de sus siglas en inglés, Surface Urban Heat Island. Este índice refleja la diferencia de temperatura entre el casco urbano y la zona rural. A partir de esta definición podemos aplicar el índice de dos maneras: o bien nos quedamos con la media de temperatura de la zona rural para restarla a la media de la zona urbana, o bien, nos quedamos restamos la temperatura media de la zona rural a cada uno de los píxeles de la imagen que componen el casco urbano y nos quedamos con la diferencia más pronunciada.

En el primer caso estamos usando el índice $SUHI_{mean}$ que obedece, tal y como se ha explicado en el párrafo anterior, la siguiente expresión [8]:

$$SUHI_{mean} = LST_{URB-MEAN} - LST_{RUR} \quad (1)$$

donde $LST_{URB-MEAN}$ corresponde a la temperatura media del casco urbano y LST_{RUR} corresponde a la temperatura de la zona rural la cual nos sirve para comparar el contraste de temperaturas.

En el segundo caso, estamos usando el índice $SUHI_{max}$ el cual se define cuantitativamente mediante la siguiente expresión [8]:

$$SUHI_{max} = MAX(LST_{URB-PÍXEL} - LST_{RUR}) \quad (2)$$

donde $LST_{URB-PÍXEL}$ corresponde al valor de temperatura para un píxel concreto del casco urbano y LST_{RUR} a la temperatura media de la zona rural que nos sirve de referencia.

Mediante la aplicación de estas expresiones se obtienen los valores numéricos de cada índice con facilidad pero falta definir las diferentes zonas o regiones [9]. En primer lugar se trata de aproximar mediante un círculo en la imagen lo que consideraremos como casco urbano, ya que todas las zonas las aproximaremos a un círculo y coronas circulares alrededor. Para realizar esta aproximación se ha hecho uso de la siguiente web; <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>. Esta web nos proporciona una información muy detalladas de la forma, delimitación y coordenadas espaciales que tiene el casco urbano de cualquier ciudad del planeta al catalogar toda la superficie terrestre según sea urbana o rural.

Una vez se ha trazado el círculo al que aproximamos el casco urbano, se ha definido las zonas rurales de acuerdo a Kasanko et al. (2006) [10] y García-Nieto et al. (2018) [11], quedándonos así tres zonas periféricas a la ciudad que forman coronas circulares alrededor de esta y que siguen estas expresiones [8]:

$$W_u = 0,25\sqrt{A} \quad (3)$$

$$W_f = 0,25\sqrt{A_{W_u}} \quad (4)$$

$$W_p = 1,25\sqrt{A} \quad (5)$$

donde A corresponde al casco urbano, W_u corresponde a la zona que nombraremos como zona urbana adyacente, A_{W_u} corresponde al casco urbano más la zona urbana adyacente, W_f corresponde a lo que nombraremos zona urbana adyacente futura y finalmente W_p corresponde a lo que nombraremos como zona peri-urbana.

Todas estas zonas rurales formaran coronas circulares alrededor del casco urbano. Como ejemplo que sea útil para visualizar esta delimitación, se muestran las figuras 2 y 3 que enseñan la delimitación de regiones llevada a cabo para Madrid y Valencia respectivamente.

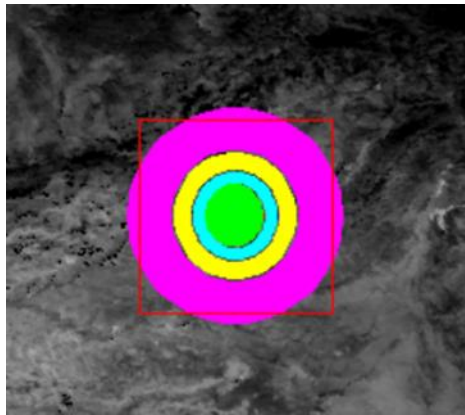


Figura 2. Zonas delimitadas para Madrid.

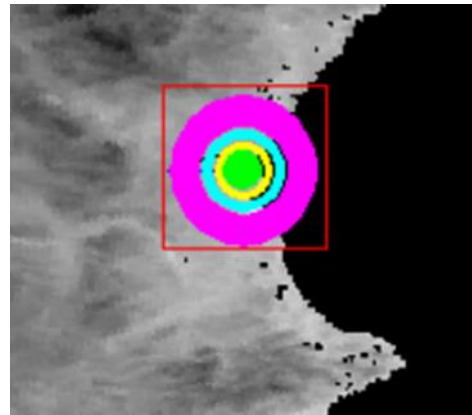


Figura 3. Zonas delimitadas para Valencia.

Además de calcular cada uno de estos índices para cada ciudad y para cada año haremos hincapié en la evolución temporal de los mismos calculando también que incremento han sufrido cada uno de ellos entre el año 2004, primer episodio de calor analizado, y el año 2019, segundo episodio de calor analizado.

2.5 Índice DI

El índice DI o índice de confortabilidad sirve para diagnosticar que grado de bienestar térmico perciben y sienten las personas que se encuentran en esa zona estudiada. Por lo cual resulta de gran utilidad ya que este bienestar térmico afecta en gran medida al descanso nocturno. La expresión que define este índice es la siguiente [8]:

$$DI = LST - (0,55 - 0,0055 f) \cdot (LST - 14,5) \quad (6)$$

donde LST corresponde a temperatura en grados Celsius y f corresponde a la humedad relativa. Para extraer los valores de humedad relativa haremos uso de la información que nos proporciona el sensor AIRS que se encuentra en esta web: [https://worldview.earthdata.nasa.gov/?I=AIRS_L3_Surface_Relative_Humidity_Daily_Night\(hidden\),MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor](https://worldview.earthdata.nasa.gov/?I=AIRS_L3_Surface_Relative_Humidity_Daily_Night(hidden),MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor).

Para comprender el significado que tiene un valor determinado de este índice hace falta prestar atención a la Tabla 1 extraída de la referencia [12]. Esta tabla se muestra a continuación:

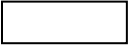






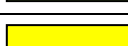


| Category DI | Temperature DI (°C) | Map Legend |
|----------------|---------------------|---|
| Hyperglacial | <-40 |  |
| Glacial | -39,9 to -20 |  |
| Extremely cold | -19,9 to -10 |  |
| Very cold | -9,9 to -1,8 |  |
| Cold | -1,7 to +12,9 |  |
| Cool | +13 to 14,9 |  |
| Comfortable | +15 to 19,9 |  |
| Hot | +20 to +26,4 |  |
| Very hot | +26,5 to +29,9 |  |
| Torrid | >+30 |  |

Tabla 1. Categorías del índice DI según [12].

Por último mencionar que, al igual que se ha hecho con el índice SUHI, que a la hora de tratar con resultados numéricos haremos uso del DI_{mean} y del DI_{max} que nos proporcionarán los valores medios y máximos para este índice que se alcanzan en el casco urbano de las ciudades seleccionadas.

3. Resultados y discusión

3.1 Madrid

En primer lugar se muestran las características geográficas de la ciudad de Madrid (Tabla 2) y más abajo (Tabla 3) aparecen sus características demográficas en los dos años estudiados [13], donde se refleja claramente un aumento de la densidad poblacional asociado a un crecimiento de la densidad de edificación, lo cual tiene una gran conexión con el efecto de isla de calor. Esta información será de gran importancia para analizar los diferentes resultados para los distintos índices analizados tal y como veremos más adelante.

| Ciudad | Longitud (°) | Latitud (°) | Altitud (m) | Área núcleo (Km ²) |
|--------|--------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Madrid | -3,6919 | 40,4189 | 657 | 604,3 |

Tabla 2. Características geográficas de Madrid.

| Año 2004 | | Año 2019 | |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) | Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) |
| 5.233 | 3.162.304 | 5.405,14 | 3.266.326 |

Tabla 3. Características demográficas de Madrid.

A continuación mostramos, como evidencia cualitativa de la manifestación del fenómeno de la isla de calor en la ciudad de Madrid, un mapa LST o de temperaturas del año 2004, primer año de estudio (Figura 4), y otro mapa LST del año 2019, segundo año de estudio (Figura 5).

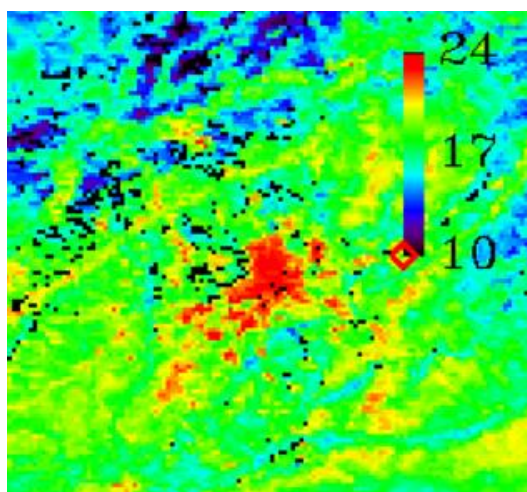


Figura 4. Mapa LST de Madrid con fecha 28/07/2004 a las 02:50 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

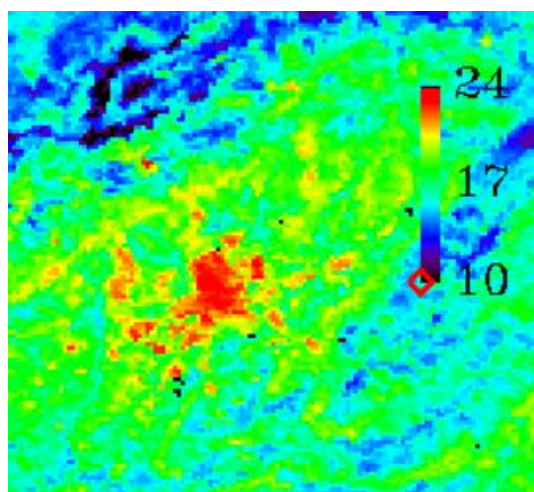


Figura 5. Mapa LST de Madrid con fecha 11/07/2019 a las 02:30 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

Ya sin realizar ningún tipo de cálculo (puesto que el producto que hemos utilizado, es decir, el producto MYD21, nos proporciona directamente la imagen con los valores de temperatura de cada píxel) podemos observar que claramente el calor se concentra en el casco urbano dibujando esa forma rojiza.

Para entrar en materia analizaremos a continuación el valor numérico para los distintos índices SUHI que hemos obtenido al analizar y procesar ambas imágenes, tanto los valores del SUHI medios como los máximos, además de aquel valor para cada una de las coronas circulas definidas alrededor del casco urbano (Tabla 4).

| Año | SUHI _{mean} | | | SUHI _{max} | | |
|----------|----------------------|-----|-----|---------------------|------|-----|
| | Wu | Wf | Wp | Wu | Wf | Wp |
| 2004 | 1,4 | 1,7 | 2,1 | 5,4 | 5,7 | 6,1 |
| 2019 | 1,2 | 1,9 | 2,9 | 4,5 | 5,3 | 6,2 |
| Δ | -0,2 | 0,2 | 0,8 | -0,9 | -0,4 | 0,1 |

Tabla 4. Valores numéricos obtenidos para los distintos índices SUHI para cada zona y año en Madrid.

A la luz de esta tabla se observa que el efecto SUHI que en el año 2004 hubo una diferencia de prácticamente 2°C entre la temperatura promedio del casco urbano y la temperatura promedio de la zona peri-urbana y una diferencia de prácticamente 6° entre la temperatura más alta del casco urbano y la temperatura promedio de la zona peri-urbana.

También se aclara en la tabla que en el año 2019 incremento casi 1°C la diferencia promedia de temperatura del casco urbano y la temperatura de la zona peri-urbana respecto del año 2004, situándose casi en los 3°C, mientras que el incremento de la diferencia entre temperatura más elevada del casco urbano y la temperatura de la zona peri-urbana subió una décima de grado. Esto significa que aquellos zonas de Madrid que concentran más calor han mantenido la temperatura en los mismos niveles que quince años atrás pero, sin embargo, como la media ha subido casi 1°C han aumentado los niveles del resto de zonas (estas zonas albergarían la subida de densidad de edificación, es decir, se habrían masificado). Para esto analizaremos las imágenes que corresponden al índice SUHI.

Antes de mostrar estas imágenes cabe mencionar que en la tabla aparecen incrementos negativos sobre todo por lo que concierne a la zona urbana adyacente. Esto se debe a que la zona metropolitana de Madrid abarca una parte de esta zona y esta zona también ha aumentado su densidad y por lo tanto es capaz de aglutinar calor.

Analicemos ahora las imágenes correspondientes al índice SUHI (Figuras 6 y 7).

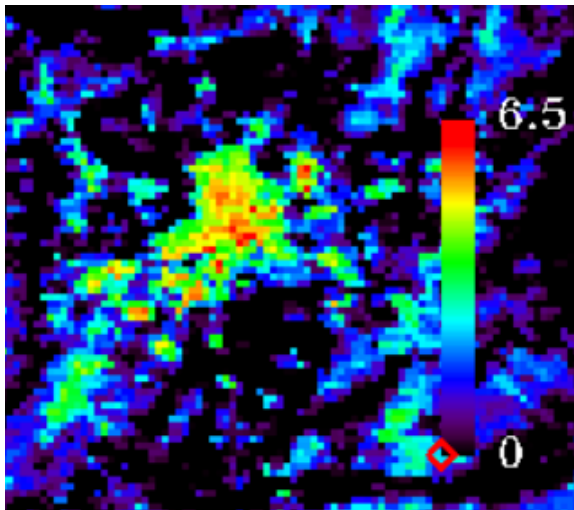


Figura 6. Índice SUHI en Madrid para el año 2004 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

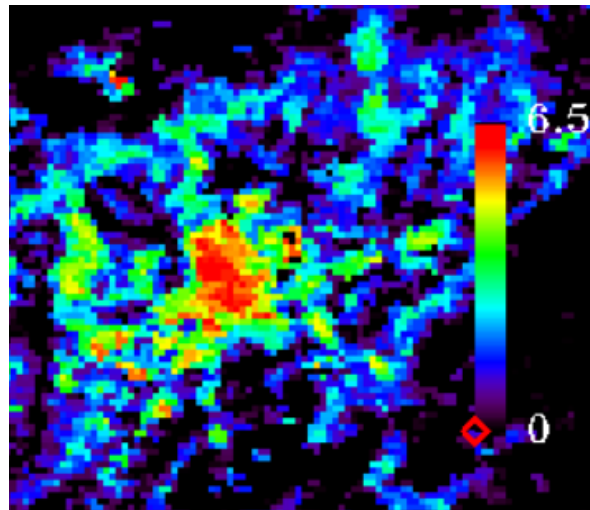


Figura 7. Índice SUHI en Madrid para el año 2019 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

A partir de estas imágenes se entiende esa subida de un grado del $SUHI_{mean}$ pues se observa con claridad que el conjunto de la ciudad de Madrid ha incrementado su índice SUHI con el tiempo.

Además se confirma lo explicado anteriormente: la zona que en 2004 presenta la mayor diferencia de temperatura respecto de las zonas externas a la ciudad es el distrito llamado Puente de Vallecas, situado al sur este de Madrid y este sigue presentando la misma diferencia con el paso del tiempo, mientras que el resto de la ciudad ha incrementado su temperatura como se observa en las imágenes. El puente de Vallecas pudo basar su temperatura superior en su gran masificación en comparación con el resto de Madrid, llegando a densidades de población superiores a los 15.000 habitantes por kilómetro cuadrado.

Pasamos finalmente al último índice, el índice de confortabilidad, DI (Tabla 5). Si comparamos los valores máximos de este índice según el año, tenemos que para el año 2004 se alcanzó un valor de 21,21 lo que implicaría una sensación térmica que según la tabla que introdujimos en la metodología experimental clasificamos como 'hot' mientras que para el año 2019 el valor máximo fue de 21,17, es decir, prácticamente el mismo. Vemos aquí un paralelismo con el $SUHI_{max}$ que también mantenía el mismo valor para los dos años. A pesar de que el valor máximo del índice no ha cambiado, el valor medio sí ha aumentado de 18,32 en el 2004 a 18,66 en 2019.

| Año | DI _{mean} | DI _{max} |
|----------|--------------------|-------------------|
| 2004 | 18,3 | 21,2 |
| 2019 | 18,7 | 21,2 |
| Δ | 0,4 | 0,0 |

Tabla 5. Valores obtenidos del índice DI para la ciudad de Madrid.

Analicemos ahora las imágenes (Figuras 8 y 9) para observar con más detalle, es decir, píxel por píxel, que valores toma este índice a lo ancho y largo del municipio de Madrid:

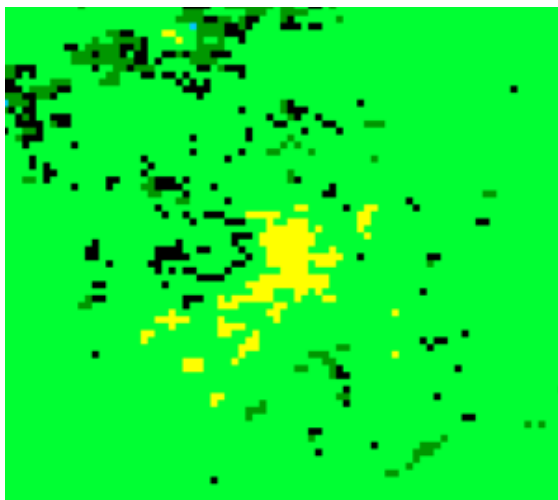


Figura 8. Índice DI en Madrid en el año 2004.

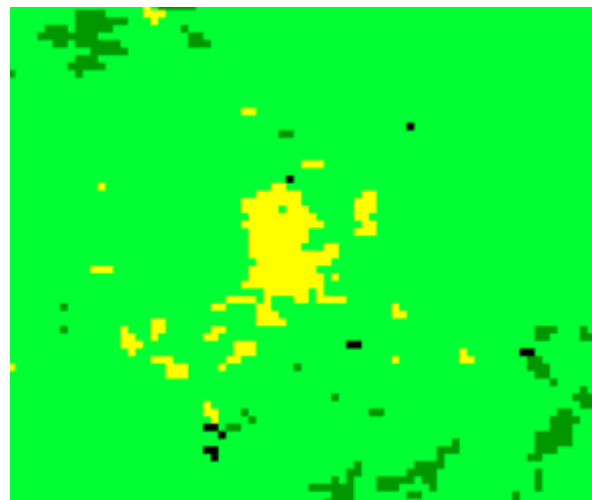


Figura 9. Índice DI en Madrid en el año 2019.

En estas imágenes se aprecia que, a pesar de que ningún píxel ha conseguido pasar de 'hot' a 'very hot' al no superar el valor de 26,5, sí que vemos que algunos píxeles han pasado de 'comfortable' a 'hot'. Los 'tentáculos' que tenía la primera figura amarilla han dado paso a una figura más ovalada ya que muchos huecos han mutado a la etiqueta 'hot'. Esto sigue siendo coherente con lo obtenido anteriormente con el índice SUHI.

Por lo tanto cabe aclarar que Madrid es una ciudad que ha empezado a acumular calor en aquellas zonas donde no se acumulaba tanto calor antes, mientras que aquellas zonas más calurosas, el sureste de Madrid y más en concreto el distrito llamado 'Puente de Vallecas', han mantenido una temperatura constante. Esto se explica comparando la población del distrito que ha sido descendiente en el tiempo a diferencia del resto de la ciudad que se ha masificado más. La población de 'Puente de Vallecas' era de 240.917 habitantes según la información proporcionada por el Ayuntamiento de Madrid en su página web, mientras que para el año 2019 su población fue de 234.770 habitantes.

Así pues la ciudad de Madrid debe intentar aliviar el efecto isla de calor en casi la totalidad de sus distritos por tal de amortiguar todas las pésimas consecuencias que trae y seguirá trayendo a sus vecinos si no cambia su evolución.

3.2 Valencia

Como hemos hecho anteriormente, se muestra en primer lugar la Tabla 6 con información geográfica sobre Valencia y la Tabla 7 con información demográfica [13] lo cual nos será de utilidad para analizar los resultados del procesado de imágenes posterior.

| Ciudad | Longitud (°) | Latitud (°) | Altitud (m) | Área núcleo (Km ²) |
|----------|--------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Valencia | -0,3750 | 39,4667 | 16 | 134,65 |

Tabla 6. Características geográficas de Valencia.

| Año 2004 | | Año 2019 | |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) | Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) |
| 5.835,38 | 785.732 | 5.899,78 | 794.288 |

Tabla 7. Características demográficas de Valencia.

Una vez tenemos esta información clara se procede a un primer análisis cualitativo de este efecto de isla de calor que se trata de estudiar mediante dos mapas LST, o de temperatura. De esta manera se muestra una imagen, Figura 10, para el año 2004 y otra imagen, Figura 11, para el año 2019.

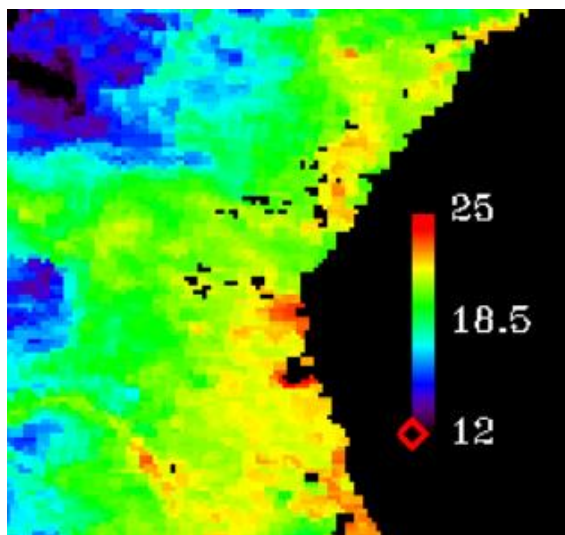


Figura 10. Mapa LST de Valencia con fecha 27/07/2004 a las 01:25 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

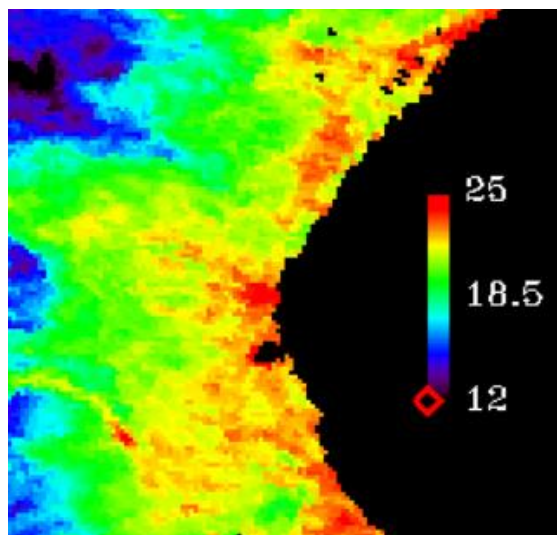


Figura 11. Mapa LST de Valencia con fecha 11/07/2019 a las 02:30 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

Ahora que ya hemos corroborado que la temperatura en Valencia destaca respecto a la temperatura de su entorno con un simple mapa de temperatura que nos

ofrece directamente el producto MYD21, pasamos a procesar las dos imágenes por tal de analizar el índice SUHI.

Por tal de aglutinar estos valores numéricos obtenidos de un tratamiento de imágenes riguroso se construye la Tabla 8, la cual se muestra a continuación.

| Año | SUHI _{mean} | | | SUHI _{max} | | |
|------|----------------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|
| | Wu | Wf | Wp | Wu | Wf | Wp |
| 2004 | 0,8 | 0,8 | 1,2 | 2,3 | 2,4 | 2,7 |
| 2019 | 0,8 | 0,9 | 1,5 | 2,8 | 2,8 | 3,4 |
| Δ | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,7 |

Tabla 8. Valores numéricos obtenidos para los distintos índices SUHI para cada zona y año en Valencia.

Lo primero que salta a la vista es que tanto el SUHI_{mean} como el SUHI_{max} tiene unos valores más pequeños que los que se han mostrado anteriormente para Madrid, lo cual tiene sentido ya que nos encontramos con una ciudad de menor envergadura, además de que su baja altura y su cercanía al mar suavizan este tipo de efectos. También llama la atención que absolutamente todas las diferentes maneras de trabajar con el índice SUHI muestran un incremento positivo al analizar su evolución temporal.

De esta tabla se extrae que para el año 2004 la temperatura media del casco urbano podía llegar a ser superior en un poco más de un grado centígrado respecto a la periferia más alejada, mientras que en el año 2019 este valor ya se acercaba a casi un grado centígrado y medio por lo que se ha incrementado en aproximadamente un tercio de grado.

Por lo que respecta a los valores máximos de temperatura, encontramos que en el año 2004 la temperatura máxima del casco urbano podía ser superior a la máxima de su periferia más próxima en un poco más de dos grados Celsius e incluso de un poco más de dos grados y medio respecto de su periferia más alejada. Para el año 2019 observamos los contrastes que tenía Valencia con su periferia más alejada ahora en la periferia más cercana, lo cual refleja el incremento de prácticamente medio grado. Respecto a la zona peri-urbana en el 2019 se mide un contraste de casi tres grados y medio, lo cual supera en casi cuatro quintos de grado a los valores del año 2004.

Para mejorar este análisis se muestra las imágenes resultantes del procesamiento necesario para tratar el índice SUHI tanto para el año 2004 como para el año 2019 (Figura 12 y Figura 13), que nos permitirán visualizar tanto el mayor contraste de temperatura con las zonas que rodean al casco urbano como extraer que zonas/distritos de la ciudad levantina concentran calor con mayor facilidad, cosa

extremadamente útil para hacer una buena previsión futura de qué criterios urbanísticos se deben aplicar a la hora de seguir desarrollando la ciudad en cuestión.

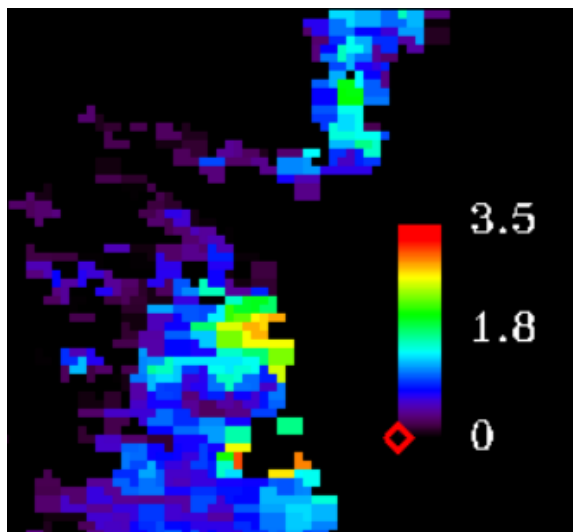


Figura 12. Índice SUHI en Valencia para el año 2004 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

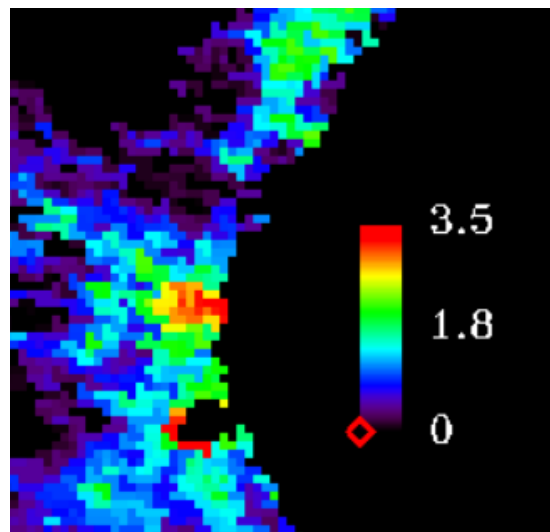


Figura 13. Índice SUHI en Valencia para el año 2019 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

En estas dos imágenes se puede observar con claridad como el efecto SUHI ha aumentado en esos 15 años de intervalo. En general ha aumentado el efecto SUHI en toda la ciudad pero sobre todo ha crecido en aquellas zonas donde había ya un mayor efecto SUHI anteriormente. Estas zonas corresponden mayoritariamente a los distritos de Pla del Reial i Camins de Grau. En este último vemos un mayor impacto lo cual se explica con facilidad si atendemos a la masificación urbanística que ha sufrido pues en el 2001 este distrito contaba con una población de 53.462 habitantes mientras que en el 2019 ascendió a 65.451 habitantes, un incremento del 22,43%.

Respecto al índice DI o de confortabilidad se han calculado los siguientes valores, que aparecen en la Tabla 9, en el casco urbano de la ciudad del Turia:

| Año | DI_{mean} | DI_{max} |
|----------|-------------|------------|
| 2004 | 20,7 | 22,0 |
| 2019 | 21,5 | 23,2 |
| Δ | 0,8 | 1,2 |

Tabla 9. Valores obtenidos del índice DI para la ciudad de Valencia.

Así pues vemos que tanto el DI_{mean} como el DI_{max} se mantiene en la categoría de “hot” tanto en el año 2004 como en el 2019, produciéndose un incremento entre los dos años de aproximadamente un valor de la unidad.

Para poder visualizar este índice se ha procesado el mapa de temperaturas para que cada píxel muestre su valor del índice, resultando en las Figuras 14 y 15 que se muestran a continuación:

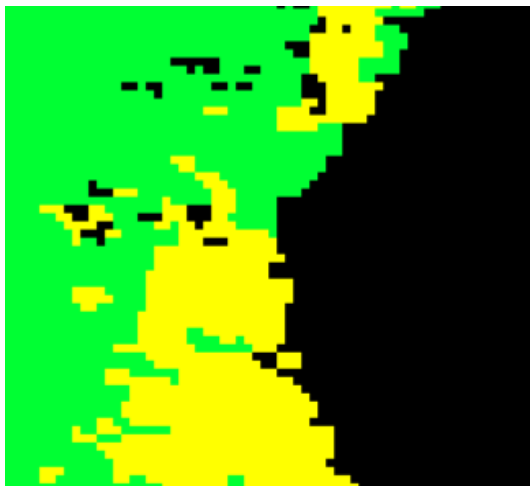


Figura 14. Índice DI en Valencia en el año 2004.

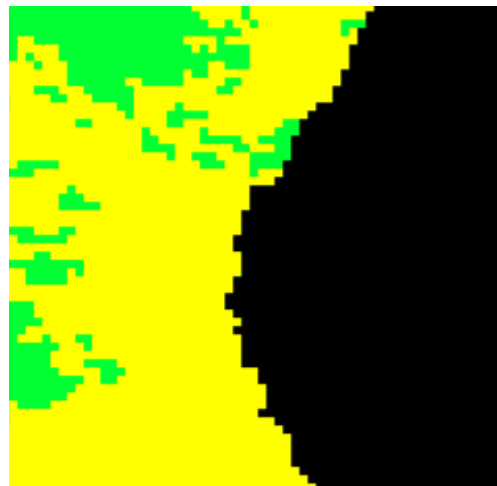


Figura 15. Índice DI en Valencia en el año 2019

En estas imágenes salta a la vista como todo el casco urbano de la ciudad se encuentra de color amarillo, es decir, dentro de la etiqueta "hot". Sin embargo se visualiza como la extensión de la zona "hot" ha crecido mucho en extensión abarcando en su totalidad toda el área metropolitana de la ciudad levantina.

3.3 Zaragoza

Como hemos hecho con las dos ciudades anteriores, se procede en primer lugar a presentar un par de tablas, la Tablas 10 y 11, que contienen información geográfica y demográfica de Zaragoza [13], la cual nos servirá de guía para entender los resultados cuantitativos.

| Ciudad | Longitud (°) | Latitud (°) | Altitud (m) | Área núcleo (Km ²) |
|----------|--------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Zaragoza | -0,8833 | 41,65 | 243 | 973,8 |

Tabla 10. Características geográficas de Zaragoza.

| Año 2004 | | Año 2019 | |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) | Densidad (hab/Km ²) | Población (hab) |
| 655,99 | 638.799 | 682,84 | 674.997 |

Tabla 11. Características demográficas de Zaragoza.

Una vez se ha expuesto esta información, se procede a mostrar los mapas LST o de temperatura, Figuras 16 y 17, que nos muestran ya de manera muy visual el fenómeno de isla de calor urbana.

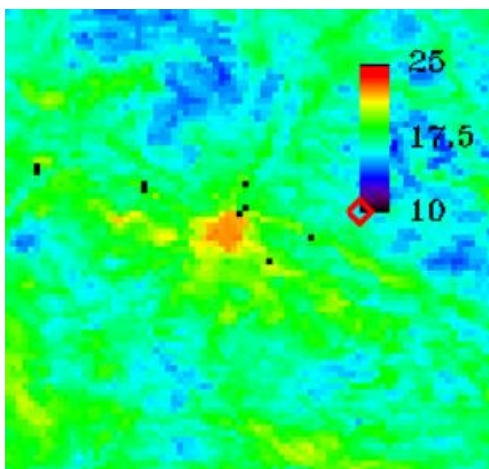


Figura 16. Mapa LST de Zaragoza con fecha 28/07/2004 a las 02:10 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

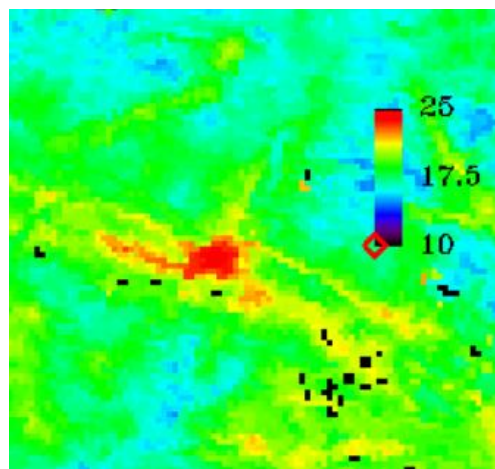


Figura 17. Mapa LST de Zaragoza con fecha 11/07/2019 a las 02:30 AM. La leyenda se encuentra en grados Celsius.

Respecto al índice SUHI se han calculado todos los valores correspondientes al $SUHI_{mean}$ y al $SUHI_{max}$ para cada uno de los años y zonas tal y como se ha llevado a cabo para el resto de ciudades. Estos valores se recopilan en la Tabla 12, que es la siguiente:

| Año | $SUHI_{mean}$ | | | $SUHI_{max}$ | | |
|----------|---------------|-----|-----|--------------|-----|-----|
| | Wu | Wf | Wp | Wu | Wf | Wp |
| 2004 | 1,6 | 2,3 | 3,2 | 3,6 | 4,3 | 5,2 |
| 2019 | 1,8 | 2,7 | 3,7 | 3,8 | 4,7 | 5,7 |
| Δ | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |

Tabla 12. Valores numéricos obtenidos para los distintos índices SUHI para cada zona y año en Zaragoza.

A partir de estos datos, se manifiesta un claro incremento de todos los distintos indicadores a lo largo de ese periodo de 15 años que abarca del 2004 al 2019. Respecto al $SUHI_{mean}$ se aclara que este indicador va subiendo progresivamente en los dos años respecto a las tres zonas analizadas al igual que sucede con el $SUHI_{max}$. Estos incrementos por zonas siguen el mismo patrón para los dos indicadores. Salta a la vista que el efecto SUHI es mayor en Zaragoza que en Valencia a pesar de que esta última es más poblada y seguramente esto se deba a que Zaragoza no es una ciudad costera. El incremento del índice en el tiempo es menos que en el resto de ciudades ya que en la zona peri-urbana apenas alcanza el medio grado Celsius lo cual tiene sentido ateniéndonos a que de las tres ciudades esta es la que menos ha crecido en población.

A continuación se enseñan las imágenes resultantes, Figuras 18 y 19, de aplicar el índice SUHI a la capital del Ebro:

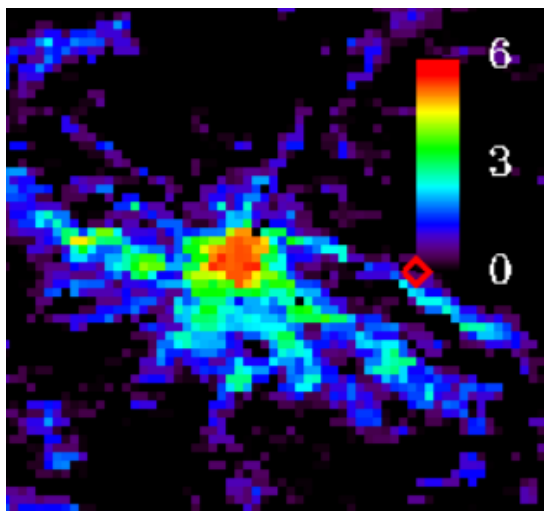


Figura 18. Índice SUHI en Zaragoza para el año 2004 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

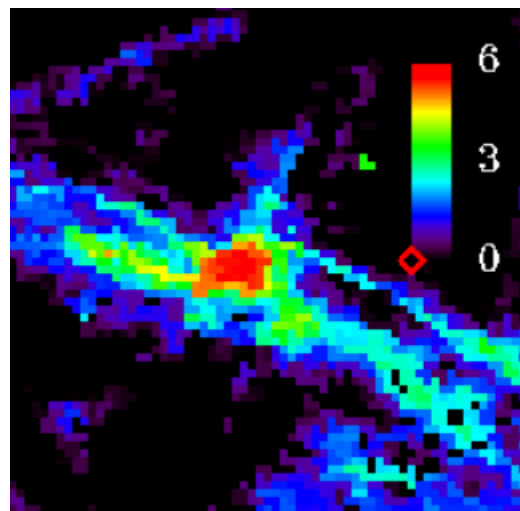


Figura 19. Índice SUHI en Zaragoza para el año 2019 respecto de la zona peri-urbana, W_p .

Al comparar ambas imágenes salta a la vista que en la totalidad de la ciudad ha aumentado el efecto isla de calor, viéndose como todo el casco urbano que salía en un tono anaranjado en la primera imagen se ha vuelto de un tono más rojizo.

Por otra parte también llama la atención como el suroeste de la ciudad ha cambiado de color en las imágenes pasando de un color verdoso a uno anaranjado, siendo esta zona la que sufre una evolución temporal más severa. Concretamente los distritos concretos a los que nos referimos son Universidad y Oliver-Valdefierro, con una población en 2004 de 31.071 habitantes y 21.977 habitantes respectivamente. Así pues esta subida del efecto isla de calor viene de la mano con la masificación de estas zonas ya que en el año 2018 estas dos zonas contaban con una población de 49.745 habitantes (un incremento del 60%) y 29.829 habitantes (un incremento del 36%), respectivamente.

Si nos centramos ahora en el índice DI o de confortabilidad, se han calculado los siguientes valores del mismo, que aparecen en la Tabla 13 la cual es esta:

| Año | DI_{mean} | DI_{max} |
|----------|-------------|------------|
| 2004 | 17,5 | 19,1 |
| 2019 | 20,8 | 22,4 |
| Δ | 3,3 | 3,3 |

Tabla 13 . Valores obtenidos del índice DI para la ciudad de Zaragoza.

Claramente resalta en la tabla que tanto para DI_{mean} como para DI_{max} todos los valores para el año 2004 se encontraban dentro de la categoría “comfortable” mientras que para el año 2019 todos los valores pasan a la categoría “hot”. Esto se vuelve muy

evidente si visualizamos las imágenes resultantes de aplicar el índice DI, Figuras 20 y 21, donde en la primera imagen no encontramos ni un solo píxel amarillo correspondiente a la categoría “hot” mientras que en la segunda imagen estos píxeles nos marcan muy correctamente la forma de la capital aragonesa.

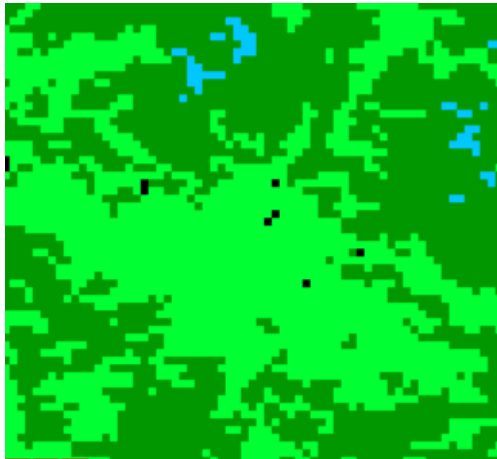


Figura 20. Índice DI en Zaragoza en el año 2004.

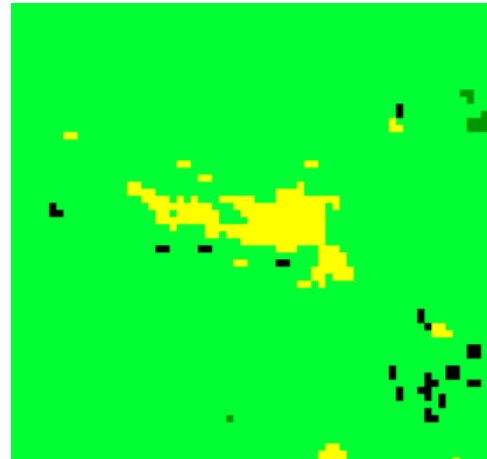


Figura 21. Índice DI en Zaragoza en el año 2019.

Además de comprobar en las imágenes que los resultados numéricos encajan y son coherentes, también se comprueba la coherencia de estas imágenes pues coincide con el incremento del índice SUHI en toda la zona central de la ciudad.

3.4 Comparativa del efecto SUHI entre las ciudades estudiadas

Finalmente, en esta sección del apartado de Resultados y Discusión se compara los valores obtenidos del índice SUHI entre las distintas ciudades para poder hacer un mejor análisis del mismo.

Así pues se ha construido la Tabla 14 que recopila cuatro gráficas donde comparar los valores de cada ciudad. De las cuatro gráficas, dos corresponden al $SUHI_{mean}$ y otras dos al $SUHI_{max}$, y de cada subgrupo de dos gráficas tenemos una para el primer año de estudio, el año 2004, y otra para el segundo año de estudio, el año 2019. De esta manera quedan justo una gráfica del primer año pegada a la gráfica del siguiente año para mejor la comparación, además de usar la misma escala en las gráficas correspondientes al $SUHI_{mean}$ y la misma escala en las gráficas correspondientes al $SUHI_{max}$. Claramente se observa en la Tabla 14 que los valores del índice SUHI han crecido para las tres ciudades seleccionadas en el periodo analizado.

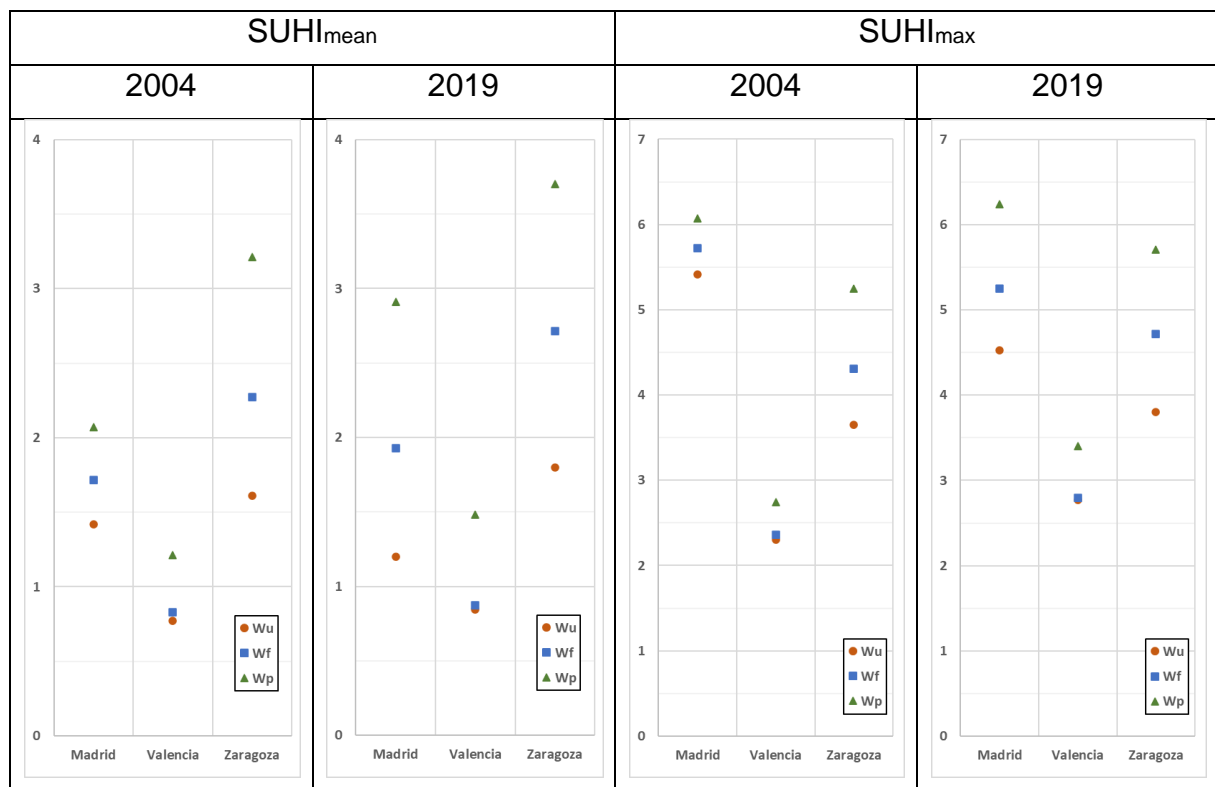


Tabla 14. Comparación del índice SUHI para cada zona, ciudad y año.

A la luz de esta gráfica se vislumbra como Valencia tiene los valores más bajos en las cuatro gráficas ya que es una ciudad costera y la brisa marina suaviza muchísimo las temperaturas del casco urbano. Por lo tanto, Valencia es una ciudad que gracias a su situación geográfica puede amortiguar mucho mejor este impacto medioambiental que otra ciudad de interior.

Otra cosa que salta a la vista es como Madrid domina en los valores de SUHI_{max} lo cual tiene sentido ya que esto es consecuencia directa de que posee las zonas con mayor densidad de edificación de todo el país, ya que es la capital política y financiera del Estado español.

Finalmente destacar que Zaragoza tiene el máximo valor correspondiente al SUHI_{mean} lo cual también tiene su lógica pues no es una ciudad costera como Valencia ni tiene un entorno tan árido como Madrid. Zaragoza posee un entorno con mucha más vegetación alrededor de su casco urbano que el que puede tener Madrid, lo cual crea un entorno mucho más fresco y por tanto tiene sentido que el contraste promedio sea muy elevado. Además aunque Zaragoza diste de tener una población como la que posee Madrid sí que posee una gran extensión mayor por ejemplo que la que posee Valencia, lo cual ayudaría a retener el calor pues tiene mayor superficie asfaltada y construida que, por su reflectividad, tiende a concentrar calor. Aunque esto puede cambiar debido a como afecte el cambio climático a la vegetación en España [14][15].

4. Conclusiones

After accomplishing this experimental procedure, we have reached the aim of this work: to analyse how the Surface Urban Heat Island effect takes place in each one of the Spanish cities selected. All of them have increased this phenomenon in the period of fifteen years that lasts from 2004 to 2019. Also, we have observed how some characteristics increase the effect, such as increasing the building density, meanwhile others soften it, such as being near the sea. So, all this results have to be taken into account in the urbanistic planification if we look for the cities to take control in what refers to thermic wellness. Finally it is appropriate to comment that a possible improvement for this academic work would be to consider the real shape of the city, without approximating it to a circle, in order to get more accurate data that would result into a better analysis and a better model to deal with this paradigm.

Después de llevar a cabo este procedimiento experimental, hemos alcanzado el objetivo de este trabajo: analizar como se manifiesta el efecto Isla de Calor Urbano en cada uno de las ciudades españolas seleccionadas. Todas ellas han incrementado este fenómeno en el periodo de quince años que abarca desde el año 2004 al año 2019. Además, hemos observado como algunas características han aumentado el efecto, tales como que se incremente la densidad de edificación, mientras otras lo han suavizado, tales como encontrarse cerca del mar. Así pues, todos estos resultados han de ser tenidos en cuenta en la planificación urbanística si buscamos que la ciudades en cuestión tengan el control en lo que refiere a bienestar térmico. Finalmente es apropiado comentar que una posible mejor de este trabajo académico sería considerar la silueta real de la ciudad, sin aproximarla a un círculo, a fin de conseguir información más precisa que resultaría en un mejor análisis y en un mejor modelo para enfrentar este paradigma.

5. Bibliografía

- [1] Kim, H.H. Urban heat island. *Int. J. Remote Sens.* 1992, 13, 2319–2336.
- [2] S. Ahmed, Assessment of urban heat islands and impact of climate change on socioeconomic over Suez Governorate using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2018, Volume 21, Issue 1, Pages 15-25, ISSN 1110-9823, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.001>.
- [3] Voogt, J.A.; Oke, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* 2003, 86, 370–384.
- [4] Oke, T.. (1973). City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment* (1967). 7. 769-779. 10.1016/0004-6981(73)90140-6.
- [5] Heaviside, Clare & Macintyre, Helen & Vardoulakis, Sotiris. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current environmental health reports*. 4. 10.1007/s40572-017-0150-3.
- [6] Ojo, Stephen & Pojwan, Martina. (2017). Urbanization and Urban Growth: Challenges and Prospects for National Development.

- [7] Zhou, D.; Xiao, J.; Bonafoni, S.; Berger, C.; Deilami, K.; Zhou, Y.; Frolking, S.; Yao, R.; Qiao, Z.; Sobrino, J.A. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sens.* 2019, 11, 48.
- [8] José A. Sobrino, Itziar Irakulis. A methodology for comparing the Surface Urban Heat Island effect in selected urban agglomerations in the world from Sentinel-3 SLSTR data. *Remote sensing*, 2020 (Aceptado).
- [9] Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012, 93, 1879–1900.
- [10] Kasanko, M., Barredo, J.I., Lavalle, C., McCormick, N., Demicheli, L., Sagris, V., Brezger, A. Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas. *Landsc. Urban Plan.* 2006, 77, 111–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.003>.
- [11] Ana Paula García-Nieto, Ilse R. Geijzendorffer, Francesc Baró, Philip K. Roche, Alberte Bondeau, Wolfgang Cramer, Impacts of urbanization around Mediterranean cities: Changes in ecosystem service supply, *Ecological Indicators*, Volume 91, 2018, Pages 589-606, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.082>.
- [12] Toy, S.; Yilmaz, S.; Yilmaz, H. Determination of bioclimatic comfort in three different land uses in the city of Erzurum, Turkey. *Build. Environ.* 2007, 42, 1315–1318.
- [13] Instituto Nacional de Estadística (www.ine.es).
- [14] Kriticos, D.J., Webber, B.L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J. & Scott, J.K. CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology & Evolution*. 2012, 3: 53-64. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2011.00134.x
- [15] Bastin J-F, Clark E, Elliott T, Hart S, van den Hoogen J, Hordijk I, et al. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLoS ONE*. 2019, 14(7): e0217592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>.