

## La utilización de imágenes satelitales en Geografía Física: un aporte para el estudio del clima urbano en la ciudad de Tandil

PICONE, Natasha <sup>1</sup>

### Introducción

La disponibilidad de información ambiental generada por la teledetección, especialmente en las imágenes satelitales, ha permitido el desarrollo de estudios a distintas escalas y de manera multitemporal en los campos dominados por la geografía (Chuvieco, 2007). Algunos ejemplos son los trabajos sobre usos de suelo urbanos y rurales, o aplicaciones a la teledetección de humedales, isla de calor, cambios geomorfológicos, entre otros (García Rodríguez y Perez González, 2010).

El clima urbano es la modificación del clima regional provocado por una ciudad (Landsberg, 1981). El fenómeno más estudiado es la *isla de calor*, que hace referencia a la presencia de mayores temperaturas en el centro del área urbana. El mismo ha sido analizado con distintas metodología: estaciones fijas, a partir de mediciones a lo largo de transectas y con la banda térmica de las imágenes satelitales (Voogt y Oke, 2003).

El primer trabajo que utilizó imágenes satelitales para estudiar el fenómeno térmico urbano es el de Matson *et al.* (1978) que realizó un análisis de la intensidad de la *isla de calor* para varias ciudades de Estados Unidos con imágenes del sensor AVHRR del programa NOAA. Las ciudades de este país son las más estudiadas durante las décadas siguientes haciendo énfasis en la relación entre los comportamientos térmicos y los valores del Índice de Vegetación Estandarizado o NDVI (Gallo *et al.*, 1995) y en el análisis de la distribución espacial de la temperatura al interior de las ciudades (Aniello *et al.*, 1995). En la línea de análisis de los posibles causantes de la isla térmica urbana Ferrer Vidal y Solé-Sugrañes (1995) realizaron un estudio en la provincia de Barcelona el cual se focalizó en la relación entre áreas de contaminación térmica y establecimiento industriales a través de imágenes satelitales Landsat 5 TM.

Utilizando la misma metodología Carnahan y Larson (1990) fueron los primeros en documentar el fenómeno de *isla fría*, este consiste en menores temperaturas en el centro urbano con respecto a sus alrededores. El mismo fenómeno fue detectado por Pérez González y García Rodríguez (2002) y Pérez González *et al.* (2003) en varias ciudades españolas con distintos sensores. Peña (2009) encontró una *isla fría* en Santiago de Chile, asociada a las coberturas que dominan en cada área analizada. En todos los casos esta distribución térmica se detectó durante la mañana, según Carnahan y Larson (1990) esto se debe a que las zonas verdes presentan una menor diferenciación térmica a lo largo del día y muestran mayores temperaturas durante la mañana que las coberturas construidas las cuales durante la noche pierden la energía y la temperatura ganada durante el día previo.

En la Argentina el único trabajo que ha utilizado esta metodologías para el análisis de la isla de calor urbano es el realizado por Oltra-Carrijo *et al.* (2010) en San Miguel de Tucumán, en él se presentó la relación entre la distribución espacial de la temperatura, las coberturas de suelo y la vegetación. En Tandil no se han desarrollado estos estudios y es por ellos que el objetivo del trabajo es analizar la evolución de la isla térmica urbana (1989 - 2011).

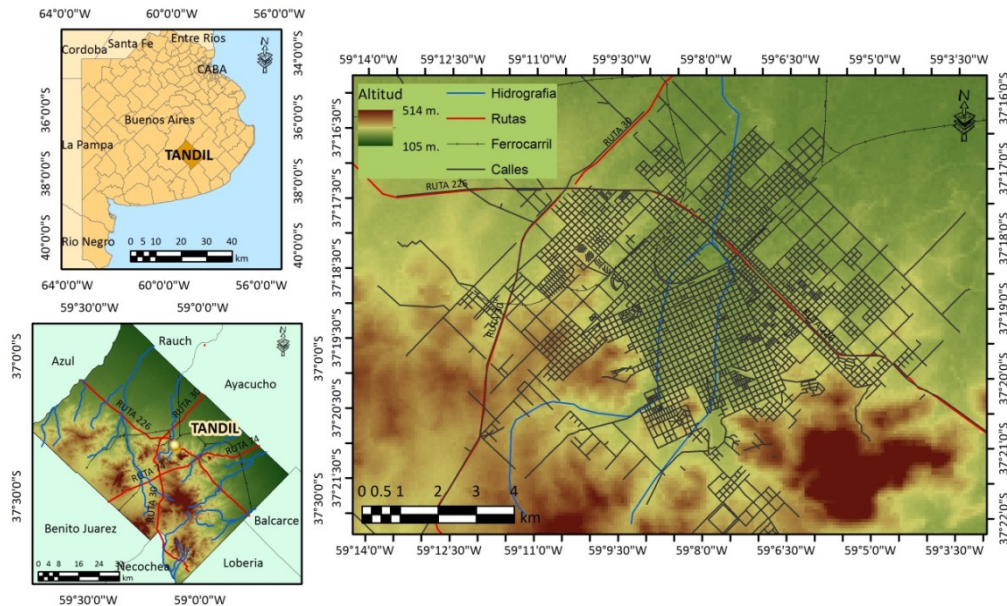
---

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Geográficas CIG-IGEHCS-FCH-CONICET/UNCPBA [natashapicone@gmail.com](mailto:natashapicone@gmail.com)

La ciudad de Tandil se ubica en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires (Figura N° 1). Ocupa el sector central de las sierras del sistema de Tandilia, donde predominan los paisajes graníticos y se localiza sobre el cauce medio de los arroyos Blanco y Del Fuerte que discurren entubados de suroeste a noreste.

Según el último censo nacional la ciudad cuenta con 116.916 y representa el 94 % de la población total del partido (INDEC, 2010). El área urbana se ha convertido en un centro regional económico, social y cultural muy importante para los partidos aledaños (Lan *et al.*, 2010).

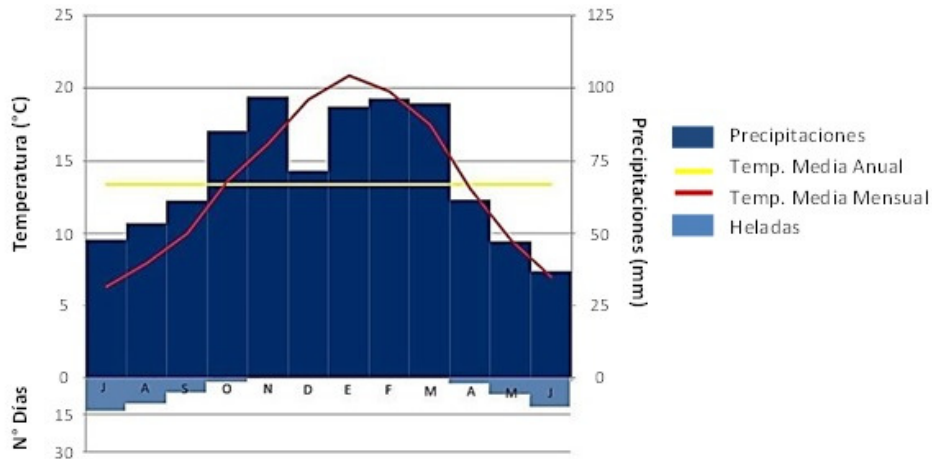
**Figura N° 1. Localización del área de estudio**



**Fuente:** Elaborado por Picone, 2014

Climáticamente tiene un clima templado de tipo chino, caracterizado por presentar dos estaciones marcadas por sus diferencias tanto térmicas como pluviales (verano e invierno) y dos estaciones de transición (otoño y primavera). La temperatura media anual de la ciudad es de 13,4 °C con una amplitud térmica anual de 14,6 °C. Las precipitaciones alcanzan los 845,2 mm anuales y se concentran entre los meses de enero y marzo con un máximo importante en octubre y noviembre, que supera los 85 mm mensuales. Siete de los doce meses del año presentan al menos un día con helada, lo que indica bajas temperaturas mínimas entre abril y octubre, pero entre junio y agosto dichas condiciones se acentúan ya que se superan los 10 días mensuales con heladas (Figura N° 2).

Figura N° 2. Diagrama ombrotérmico de Tandil. Período 2001 – 2010



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Elaborado por Picone, 2014

### Metodología

Las imágenes utilizadas son del Landsat 5 TM, las mismas fueron descargadas de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos – USGS ([glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov)) y todas poseen una calibración radiométrica y geométrica previa. Las imágenes pertenecen al Path 225 Row 86 correspondientes al área de Tandil y fueron tomadas alrededor de las 10:30 a.m. Se utilizaron cuatro imágenes de primavera: 27/10/1989, 30/10/1996, 03/11/2003 y 24/10/2011. Estas fueron seleccionadas de modo que representen condiciones atmosféricas similares: todas corresponden a primavera, presentan valores meteorológicos parecidos e Índices de Precipitaciones Estandarizados entre 1 y -1.

Todas las bandas, excepto la seis, fue sometida a una corrección atmosférica a través del método de sustracción de objetos oscuros (Chávez, 1998), el mismo postula que la bruma atmosférica incrementa los ND en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar valores de reflectancia muy próxima a cero. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$k = \frac{D (L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{o,k} \cos \theta_{i,k,i}}$$

donde D es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol,  $L_{sen,k}$  corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k,  $L_{a,k}$  es la radiancia atmosférica debida a la dispersión y se estimaría a partir del valor mínimo o de un objeto de reflectividad nula,  $E_{o,k}$  es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esa banda del espectro),  $\theta_i$  es el ángulo cenital del flujo incidente y  $\tau_{k,i}$  es la transmisividad atmosférica que afecta al rayo incidente.

Por otro lado la banda seis de cada imagen fue sometida a calibración donde se convirtieron los valores de cada pixel (Número Digital) a un valor radiométrico para eliminar el ruido que generan los propios sensores (Chanderet *al.* 2009; Chuvieco, 2010). Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$L_\lambda = \frac{DN \times (L_{max} - L_{min})}{255} + L_{min}$$

donde  $L_\lambda$  es el valor de radiancia del pixel, DN es el número digital del pixel,  $L_{max}$  y  $L_{min}$  de cada banda del sensor TM fueron obtenidos de Chandret *et al.* (2009).

La *temperatura de brillo* ( $T_b$ ) es la temperatura que el sensor remoto obtiene directamente, en el caso del Landsat 5 TM en su banda 6 (que captura el espectro solar entre 10,45  $\mu\text{m}$  – 12,42  $\mu\text{m}$ ). La temperatura de brillo no posee corrección atmosférica como la temperatura de superficie, pero ambas muestran la misma distribución de la temperatura del suelo con variaciones en los valores obtenidos. Por lo tanto, la  $T_b$  es utilizada para conocer los patrones térmicos en la ciudad (Xu and Chen, 2003). Para obtenerla se utiliza la siguiente ecuación que se deriva de la inversa de la Ley de Planck:

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

donde T es la temperatura en  $^\circ\text{K}$ ,  $K_1$  y  $K_2$  son constantes de calibración determinadas para cada sensor (en el sensor TM son:  $K_1 = 607.76 \text{ mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$  y  $K_2 = 1260.56 \text{ }^\circ\text{K}$ ) y  $L_\lambda$  es la radiación espectral expresada en  $\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ .

El *build-up index* (He *et al.*, 2010) es un índice que permite analizar el área construida de una determinada zona. El mismo utiliza como insumos básicos el NDVI (Índice de Vegetación Estandarizado) y el NDBI (Índice de Áreas Construidas Estandarizado). El primero de ellos determina la cantidad y la calidad de la vegetación, a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{banda 4} - \text{banda 3})}{(\text{banda 4} + \text{banda 3})}$$

Por otro lado, el NDBI presenta las áreas construidas según la proporción de construcción en cada pixel. El mismo se obtiene calculando la fórmula:

$$\text{NDBI} = \frac{(\text{banda 5} - \text{banda 4})}{(\text{banda 5} + \text{banda 4})}$$

Por último el *built-up area index* se calcula restando el NDVI al NDBI, de esta manera se obtiene un mapa continuo de área construida en el que se representan las distintas proporciones de edificación y vegetación en cada pixel. A mayor valor de índice la construcción es más densa y posee menor proporción de área verde.

## Resultados

La Figura N° 3 muestra la evolución de la isla térmica urbana entre 1989 – 2011. Se puede observar que la amplitud térmica al interior de la ciudad se ha intensificado y que la distribución espacial de las temperaturas ha cambiado.

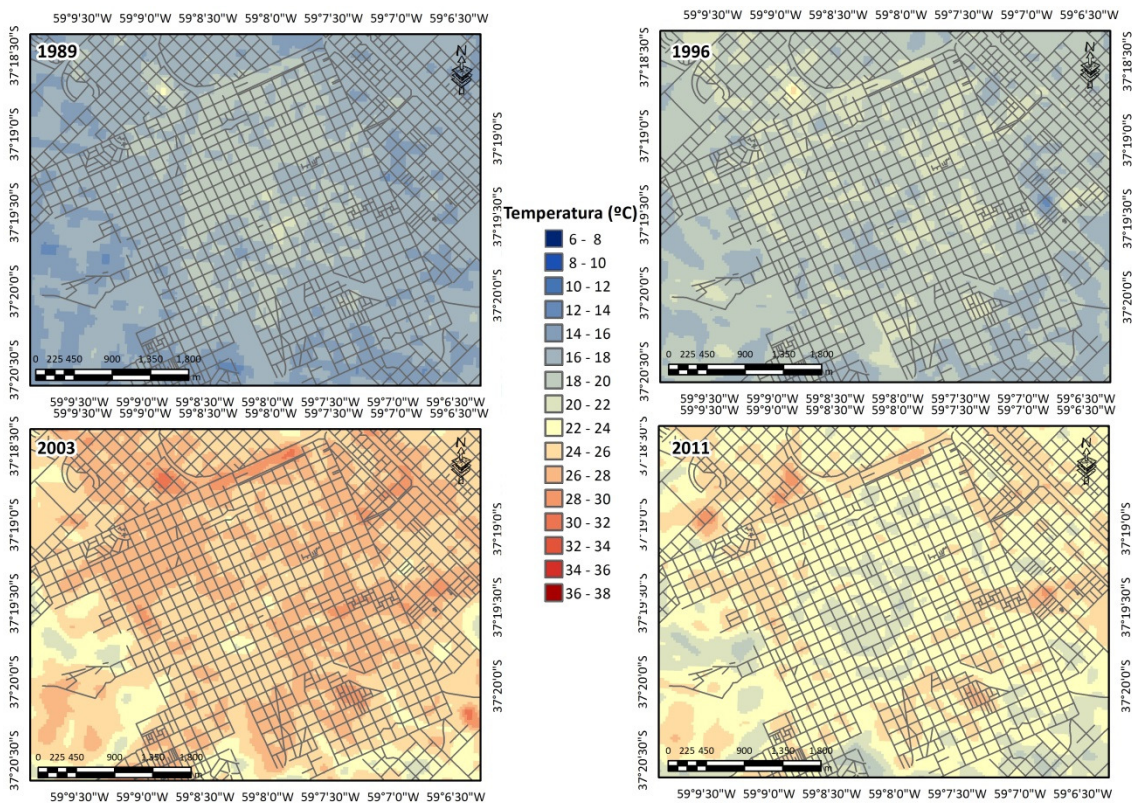
La intensificación de la amplitud térmica urbana es un fenómeno muy estudiado en las ciudades del mundo, ya que cada una de las coberturas de suelo presentes en ella tiene un comportamiento térmico determinado. Los cambios en dichas coberturas y la densificación de la ciudad aumentan las diferencias térmicas al interior de la misma. Entre 1989 y 2011 la amplitud térmica aumento 10  $^\circ\text{C}$  como resultado del incremento de la temperatura máxima. De esta manera en 1989 la diferencia térmica era de 6  $^\circ\text{C}$  mientras que en 2011 la misma se intensificó teniendo un valor de 16  $^\circ\text{C}$ . La temperatura mínima en ambos años fue de 14  $^\circ\text{C}$ , pero el aumento de la temperatura máxima de 20  $^\circ\text{C}$  en 1989 a 30  $^\circ\text{C}$  en 2011, marcó el aumento en dicho parámetro. Esto es



consecuencia del acrecentamiento de superficies construidas en detrimento de las áreas verdes, capaces de regular la temperatura. 1996 y 2003 presentaron situaciones intermedias con tendencias al aumento de las diferencias térmicas, 8 °C en 1996 y 14 °C en 2003.

En cuanto al segundo proceso, en 1989 se observó que el centro urbano presentó mayores temperaturas que sus alrededores, un claro efecto de *isla de calor*. Se destacó que al noroeste del centro existe un punto caliente que coincide con el asentamiento de Metalúrgica Tandil. El mapa de 1996 mostró que las mayores temperaturas se ubicaron en el noroeste de la ciudad y existieron algunas zonas cálidas por fuera del centro, pero ya no se observó una *isla de calor*. En el año 2003 el centro presentó menores temperaturas que sus alrededores, generado un fenómeno de *isla fría*. Los puntos calientes se concentraron en el norte. Por último, el mapa de 2011 exhibió un efecto de *isla fría* bien marcado con temperaturas bajas en el centro y puntos calientes en el norte y el este de la ciudad, los cuales coincidieron con grandes superficies de concreto (Estación de ferrocarril y ómnibus, hipermercados con grandes playas de estacionamiento y Metalúrgica Tandil).

Figura N° 3. Evolución de la isla térmica en la ciudad de Tandil (1989 - 2011)



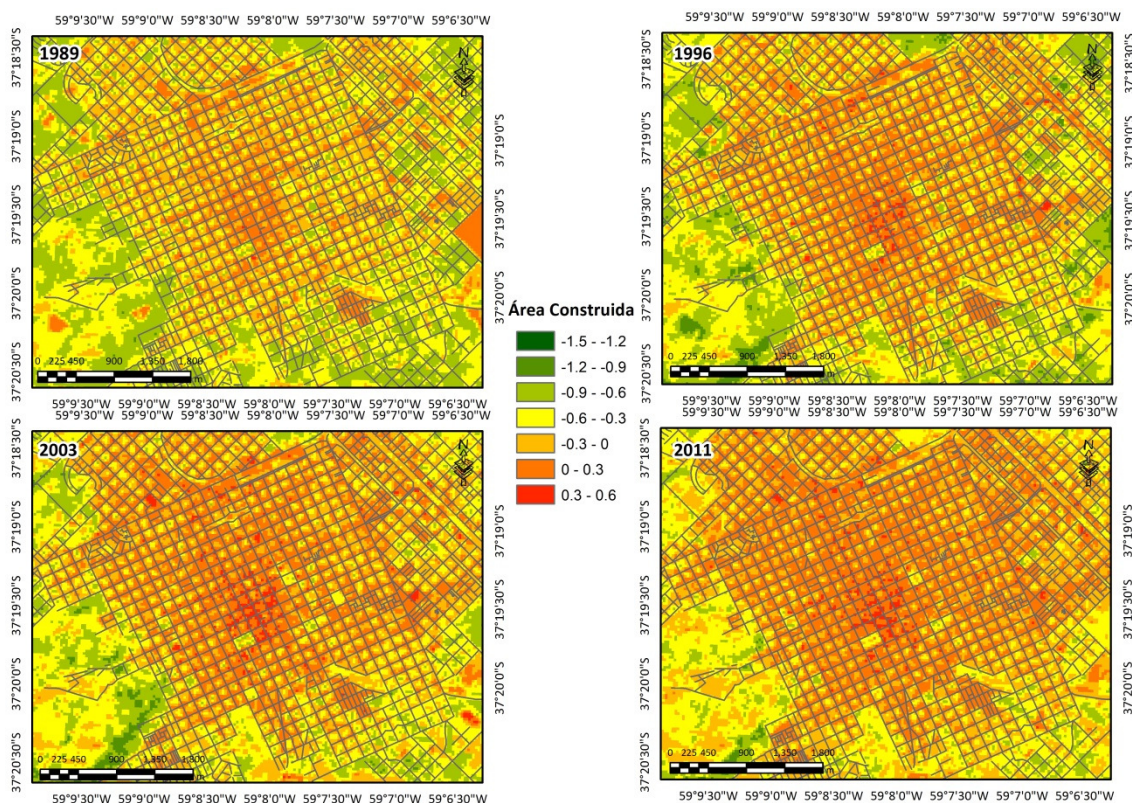
Fuente: Elaborado por Picone, 2014.

Los efectos de *isla fría* han sido muy estudiados a partir de imágenes satelitales. Según Carnahan y Larson (1990) dicho fenómeno tiene su máxima expresión durante la mañana, ya que los materiales que dominan en las construcciones urbanas ganan temperatura durante el día y la pierden a la noche, por lo que las primeras horas de la mañana están más frías que las áreas verdes que tiene el comportamiento opuesto por su carácter regulador. De esta manera se explican las distribuciones espaciales de temperatura que se presentaron en los mapas de los

últimos años analizados. Por otro lado, para entender el cambio en el signo de la isla térmica de la ciudad se deben estudiar los patrones de construcción que existía en cada año, para lo cual se utilizó el *built-up index*. Este índice permite conocer el doble proceso que se produce en las áreas urbanas, en primer lugar el aumento de la construcción y por otro lado, la reducción de las zonas verdes.

En la Figura N° 4 se observan los valores del *built-up index* para cada año analizado. En 1989 los valores positivos se encontraron en el área central, en algunas áreas del sureste y el norte de la ciudad y en los principales accesos. El resto del área urbana presentó valores cercanos al cero, pero la mayoría de los centros de manzana y las zonas alejadas del centro mostraron valores negativos, lo que indicó la predominancia de áreas verdes. 1996 presentó un incremento generalizado de las construcciones y una reducción en el área verde al interior de la ciudad. En el centro aparecieron pixeles con valores altos de construcción que no existía en el mapa anterior. El año 2003 continuó el proceso de densificación urbana sobre todo hacia el este del centro urbano, con algunas áreas puntuales de concentración alta de edificación en el centro, el este y el norte de la ciudad. Por último, en el año 2011 el aumento de los valores de construcción es llamativo, sobre todo en el centro donde desaparecieron casi por completo los centros de manzana con vegetación. En el área central de la ciudad sólo se destacaron como áreas verdes las plazas.

Figura N° 4. Evolución del *built-up index* en la ciudad de Tandil (1989 – 2011)



Fuente: Elaborado por Picone, 2014

El aumento de la amplitud térmica estuvo asociado a la reducción de áreas verdes cuyo comportamiento regulador permitía disminuir las diferencias térmicas al interior de la ciudad. Por otro lado, el cambio de signo en la isla térmica fue causado por el aumento de las superficies



densamente construidas en el área central de la ciudad, cuyos comportamiento térmicos son opuestos a las áreas verdes que siguieron presentes en los alrededores del centro.

### Conclusiones

Este trabajo presentó la evolución de la isla térmica de la ciudad de Tandil (1989 – 2011) utilizando como base imágenes satelitales del Landsat 5 TM. Las mismas fueron de gran importancia ya que suplieron la falta de información de base sobre el fenómeno en el área de estudio, permitiendo conocer los cambios del mismo en los últimos 25 años.

El análisis demostró que la isla térmica urbana aumento su intensidad en 10 °C como producto de la reducción de áreas verdes capaces de regular la temperatura. Por otro lado, se presentaron variaciones en la distribución espacial de las temperaturas. En 1989 se observó una *isla de calor* mientras que en 2011 el fenómeno fue una *isla fría*. Este cambio pudo ser atribuido al reemplazo en el área central de la ciudad de áreas vegetadas por construcciones densas cuyos comportamientos térmicos son opuestos.

Por último, la utilización del *built-up index* fue una herramienta muy valiosa para comprender los fenómenos térmicos. El hecho que dicho índice sea un resumen del proceso de urbanización permitiendo analizar el doble fenómeno de aumento de área construida y reducción de área vegetada ha sido fundamento para el análisis de las implicancias del proceso de urbanización en la temperatura.

### Bibliografía

ANIELLO, C., MORGAN, K., BUSBEY, A. Y NEWLAND, L. (1995) “*Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and GIS*” en **Computers & Geosciences**, 21,8. pp. 965-969.

CARNAHAN, W.H. Y LARSON, R.C. (1990) “*An Analysis of an Urban Heat Sink*” en **Remote Sensing of Environment**, 33. pp. 65-71.

CHANDER, G., MARKHAM, B.L. AND HELDER, D.L. (2009) “*Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors*” en **Remote Sensing of Environment**, 11-3. pp. 893-903.

CHAVEZ, P. S. (1988). “*An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*” en **Remote Sensing of Environment**, 24. pp. 459-479.

CHUVIECO, E. (2007) “*Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: tendencias en teledetección y su situación en la geografía española*” en **Documentos de Análisis Geográfico**, N° 50. pp 75 – 85.

CHUVIECO, E. (2010) **Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio**. Editorial Planeta, S. A. Barcelona. 591 pp.

FERRER VIDAL, V. Y SOLÉ-SUGRAÑES, U. (1995) “*Caracterización de emisiones térmicas en áreas suburbanas mediante imágenes Thematic Mapper*” en **Revista de Teledetección**, 5. pp. 1-5.

GALLO, K.P., TARPLEY, J.D., MCNAB, A.L. Y KARL, T.R. (1995) “*Assessment of urban heat islands: a satellite perspective*” en **Atmospheric Research**, 37. pp. 37-43.

- GARCÍA RODRÍGUEZ, M. P. Y PÉREZ GONZÁLEZ, M. E. (2010) “Aplicaciones de la teledetección en geografía física en la Universidad Complutense de Madrid” en **Serie Geográfica**, 16. pp. 9 – 18.
- HE, C., SHI, P., XIE, D. Y ZHAO, Y. (2010) “Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using semiautomatic segmentation approach” en **Remote Sensing Letters**, 1:4. pp 213 - 221.
- INDEC (2010). **Censo Nacional de 2010**. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Buenos Aires, Argentina.
- LAN, D., LINARES, S., DI NUCCI, J Y LOPEZ PONS, M. M. (2010) “La lógica de la organización espacial de la ciudad de Tandil” en Elias, D. Beltrão Sposito, M. E. y Piberiro Soares, B. (Org): **Agentes Econômicos e restauração urbana regional. Tandil e Uberlândia**. Editora Expressão Popular, San Pablo, Brasil. pp. 29-155.
- LANDSBERG, H. E. (1981): **The Urban Climate**. Academic Press, INC. Nueva York, Estados Unidos. 275 pp.
- MATSON, M., MCCLAIN, E.P., MCGINNIS, D.F Y PRITCHARD, J.A. (1978) “Satellite detection of Urban Heat Island” en **Monthly Weather Review**, 106. pp. 1725-1734.
- OLTRA-CARRIÓ, R., SOBRINO, J. A., GUTIÉRREZ-ANGONESE, J., GIOIA, A., PAOLINI, L. AND MALIZIA, A. (2010) “Estudio del crecimiento urbano, de la estructura de la vegetación y de la temperatura de la superficie del Gran San Miguel de Tucumán, Argentina” en **Revista de Teledetección**, 34. pp. 69-76.
- PEÑA, M. (2009) “Examination of the land surface temperature response for Santiago, Chile” en **Photogrammetric engineering and remote sensing**, 75-10. pp. 1191-1200.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.E. Y GARCÍA RODRÍGUEZ, M. P. (2002) “Cartografía térmica del área metropolitana de Madrid a partir del sensor ERM del Landsat 7” en **Anales de Geografía de La Universidad Complutense**. Volumen extraordinario. pp. 377-386.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.E., GARCÍA RODRIGUEZ M. P. Y GUERRA ZABALLOS, A. (2003) “Análisis del clima urbano a partir de imágenes satélite en el centro de la península española” en **Anales de Geografía de la Universidad Complutense** 23. pp. 187-206.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (2011): *Estadísticas Climatológicas*. Serie 2001-2010.
- VOOGT, J. A. Y OKE, T.R. (2003) “Thermal remote sensing of urban climates” en **Remote Sensing of Environment**, 86. pp. 370-384.
- XU, H. Y CHEN, B. (2003) “An image processing technique for the study of Urban Heat Island changes using different seasonal remote sensing data” en **Remote Sensing Technology and Application**, 18-3. pp. 129-133.