

## PROCESAMIENTO DE DATOS TERMICOS SATELITALES PARA LA OBTENCIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA

Mario Cúnsulo<sup>1</sup>, Alejandra Kurbán<sup>2</sup>, Alberto Papparelli<sup>3</sup>, Eduardo Montilla<sup>4</sup>

INEAA (Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental)  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) – Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)  
Santa Fe 198 Oeste 1º Piso, J5400ZAA San Juan. Email: [arqamb@unsj.edu.ar](mailto:arqamb@unsj.edu.ar). Tel (0264) 4202664

Recibido 12/08/13, aceptado 22/09/13

**RESUMEN:** Se presentan resultados de un estudio realizado en la ciudad de San Juan para la determinación de la Isla de Calor Urbana (ICU) en invierno y verano, continuando trabajos anteriores que demostraron la viabilidad de utilizar imágenes satelitales Landsat 5 TM+ para la determinación de la temperatura del aire. La información térmica obtenida a partir de dichas imágenes se referenció con datos térmicos del área urbana obtenidos en una estación meteorológica que registra valores horarios. Posteriormente se extrapolaron para trasladar la hora de registro satelital de las 16:00hs (HOA) a las 21:00hs HOA, hora en que la diferencia de temperatura Centro-Periferia es más representativa de la ICU. Los resultados demostraron una intensidad máxima de la Isla de Calor de 5,0°C para verano y 4,5 °C para invierno, valores que confirman los obtenidos en proyectos anteriores en los que se utilizaron datos de temperatura obtenidos *in situ*. Por otra parte la ICU presenta un patrón morfológico similar al límite urbano, tanto para invierno como para verano, extendiéndose más allá del límite urbano, con magnitudes diferentes según las distintas orientaciones cardinales.

**Palabras Clave:** Temperatura del aire urbano, Sensores remotos, Clima Urbano, Límite urbano.

### INTRODUCCIÓN

La cuantificación del fenómeno de la isla de calor urbana mediante mediciones térmicas *in situ*, requiere un importante esfuerzo de personas e implica invertir mucho tiempo de registro. El hecho de poder contar con imágenes satelitales con información en la banda térmica, simplifica notablemente el trabajo de recolección de datos en forma detallada, con la ventaja adicional de la simultaneidad, que no se tiene con el método de mediciones itinerantes.

Utilizando imágenes satelitales se determinó, en un trabajo previo (Cúnsulo, *et al*, 2012) el Índice de Vegetación Arbórea (NDVI), derivado de la temperatura de Superficie y posteriormente se infirió la temperatura del aire urbano utilizando el método TvX (Goetz, *et al*, 2000), para algunos sitios con características urbanísticas y de entorno muy diferentes. Se concluyó que la utilización de imágenes satelitales para la determinación de la temperatura del aire es viable y puede resultar una herramienta muy efectiva. En base a dicho trabajo, se profundizó y amplió el análisis, extendiéndolo a toda la trama urbana del Gran San Juan. Se consideró el esquema radial de nodos utilizado en otros trabajos de Isla de Calor para la misma área de estudio (Cúnsulo, *et al*, 2009), a fin de comparar los resultados con los obtenidos anteriormente, utilizando metodología de mediciones itinerantes tri-diurnas con correcciones horarias.

### PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes utilizadas fueron Landsat 5 TM+ correspondientes a invierno y verano, con escasa o nula cobertura nubosa disponibles en CONAE, sin deficiencias de adquisición en sus Bandas, que cubrían el área de la ciudad de San Juan, y que proveían la BANDA DEL INFRARROJO CERCANO o NIR y una resolución espacial conveniente, Las mismas se muestran en la Tabla 1.

Para el procesamiento se utilizó un software específico para interpretación de imágenes satelitales y se siguió el procedimiento desarrollado por Cotlier, *et al*. (2010). En primer lugar se realiza una calibración radiométrica, incluyendo la corrección atmosférica, la que resulta indispensable para efectuar estudios multi-temporales en imágenes satelitales. Se utiliza el método denominado 'Dark Object Substraction'. Las fórmulas utilizadas para transformar los valores digitales a valores de reflectividad son las ecuaciones 1 y 2 (Chander y Markham, 2003; Chander, *et al*., 2007). La ecuación (1) convierte los valores digitales (ND) a valores de radiancia (L) y la ecuación 2 convierte los valores de radiancia a valores de reflectividad ( $\rho$ ).

$$L_{\lambda} = G_{\lambda} (ND - ND_{\min}) + B_{\lambda} \quad (1) \quad (2)$$

<sup>1</sup> Profesional Principal CONICET; Profesor de Enseñanza Media UNSJ

<sup>2</sup> Directora INEAA; Profesor Titular FAUD-UNSJ; Profesional Principal CONICET

<sup>3</sup> Profesor Titular FAUD-UNSJ; Profesional Principal CONICET

<sup>4</sup> Profesor Jefe de Trabajos Prácticos FAUD-UNSJ

En la ecuación (1)  $G_\lambda$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) (Ganancia) y  $B_\lambda$  (Bias) ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) son los coeficientes de transformación de ND (Números Digitales) a valores de radiancia. El valor  $ND_{min}$  se resta a todos los píxeles (en las bandas del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético), como método de corrección atmosférica, para eliminar el efecto reflector que produce la atmósfera. Estos se obtienen de tablas en función de la fecha de obtención de la imagen satelital (Chander y Markham, 2003). Posteriormente se calcula el NDVI (Índice Diferencial de Vegetación Normalizado), utilizando las bandas 3 y 4 de las imágenes satelitales; éste varía entre -1 y 1. En la etapa siguiente se calcula la temperatura superficial (LST) utilizando las bandas 3, 4 y 6 (rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico respectivamente), aplicando la técnica monocanal desarrollada por Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003).

En la Ecuación (2),  $\pi$  (sr) representa la hipótesis de superficie Lambertiana uniforme y bajo condiciones libre de nubes,  $d$  es la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas (UA),  $E_{\lambda 0}$  es la irradiancia solar espectral exoatmosférica ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) y  $\Theta_z$  es el ángulo cenital solar (depende del día y hora de la toma de imagen, información que se encuentra en el archivo header), el subíndice  $\lambda$  indica el número de la banda.

Nº Imagen	Instrumento	Fecha	Elevación ° - rad	Hora solar	Azimet solar ° - rad	Pixel
11 78707	LS 5 TM	09 / 12 / 2010 (Verano)	60° - 1.047	14:30	81° - 1,414	25
11 78708	LS 5 TM	25 / 12 / 2010 (Verano)	58° - 1.012	14:30	84° - 1,466	25
11 78709	LS 5 TM	10 / 01 / 2011 (Verano)	56° - 0,977	14:30	82° - 1,431	25
11 78710	LS 5 TM	26 / 01 / 2011 (Verano)	54° - 0,942	14:30	78° - 1,361	25
11 78712	LS 5 TM	22 / 08 / 2011 (Invierno)	35° - 0,611	14:30	44° - 0,768	25

Tabla 1: Características de la imágenes satelitales Landsat 5 TM+

Una vez obtenida la temperatura de superficie, se sigue el procedimiento descrito por Goetz, *et al* (2000), para la inferencia de la temperatura del aire cercana al suelo, el que se basa en asumir que la temperatura radiométrica de una canopia arbórea frondosa está en equilibrio con la temperatura del aire ambiente, debido a que la vegetación densa posee una muy similar capacidad térmica a la del aire que la circunda. (Goward, *et al*, 1994). El método denominado TvX consiste en determinar un muestreo amplio de relaciones entre el índice normalizado de vegetación NDVI y la temperatura de superficie, para obtener los coeficientes de regresión que se usan para resolver la siguiente ecuación:

$$T_a = a \times NDVI_{max} + b \quad (3)$$

$NDVI_{max}$  se fija entre 0,6 y 0,9 dependiendo del instrumento del satélite utilizado; los valores de  $a$  y  $b$  son los coeficientes de regresión.

## CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE

A fin de evaluar la aproximación de la Temperatura del Aire calculada con Goetz, *et al* (2000) y para proceder a su ajuste, se confrontaron estos valores, con registros de la Estación Meteorológica propiedad del INEAA, situada en la Banda Eminentemente Urbana de la ciudad (terrazza del edificio en el que funciona el INEAA), para esas mismas fechas y hora. Para efectuar dicha termo-referenciación, se calculó el porcentaje en el que la temperatura del aire obtenida del procesamiento de la imagen satelital, difiere de la temperatura del aire real, medida con la Estación Meteorológica urbana para las 14:30 hora solar verdadera (HSV), que equivale aproximadamente a las 16:00 hora oficial argentina (HOA):

$$\% \text{ de Termo-referenciación: } (T_{aire SAT} - T_{aire EM}) / T_{aire SAT} * 100 \quad (4)$$

Debido a que las fechas de las imágenes no eran representativas de las condiciones promedio históricas, para corregir esta atipicidad se aplicó un factor de corrección histórica que tiene en cuenta el promedio del día de registro satelital en relación al promedio histórico.

Se calculó un Factor de Multiplicación para ser aplicado a cada píxel, generando así la Imagen de Taire Termo-referenciada.

$$\text{Factor de Multiplicación: } (100 - \% \text{ Termo-referenciación}) / 100 * \text{Corrección Histórica} \quad (5)$$

En la Tabla 2 se presentan para la hora 14:30 HOA de los días de toma de las imágenes, la siguiente información: Fecha; el número de la imagen, Taire en la Estación Meteorológica; Taire según las imágenes satelitales (calculadas con Goetz); Porcentaje de Termo-referenciación, Corrección Histórica y Factor de multiplicación. Este factor de multiplicación se implementa como fórmula en la opción BandMath del soft, para obtener la imagen de temperatura final del aire.

Sobre la imagen de temperatura del aire obtenida, se establecen Regiones de Interés (ROIs), en coincidencia espacial con los nodos urbanos definidos en trabajos previos (Cúnsulo, *et al*, 2009). La Temperatura del Aire en cada Nodo urbano se calculó como el promedio de temperatura de todos los píxeles que conforman la ROI. En el menú del software se elige la opción OVERLAY, y ahí la categoría Region of Interest. Se elige la opción Zoom para trabajar con mayor precisión. En el tipo de ROI (ROI Type) se elige Elipse y se determina un círculo de 12 píxeles. Se puede mover éste hasta hacerlo coincidir con el centro del nodo urbano. Se utiliza la opción Stats de cuya pantalla se extrae el valor promedio (Mean). Este valor se adopta como temperatura del Nodo considerado. En la Figura 1 se muestra la superposición de ROIs sobre la imagen de temperatura del aire de invierno 2011. El mismo procedimiento se realiza para las imágenes de verano.

Fecha	Imagen N°	Taire <sub>EM</sub> (En Estación Meteorológica) (°C)	Taire <sub>SAT</sub> en nodo SO 3 (INEEA) (°C)	Termoref. (%)	Corrección Histórica	Factor de Multiplicación
22-ago-11	11 78712	20,6	19,1	-7,28	1,00	1,07
09-dic-10	11 78707	36,9	38,9	5,14	0,95	0,90
25-dic-10	11 78708	34,0	38,5	11,69	0,91	0,80
10-ene-11	11 78709	28,7	31,2	8,01	1,16	1,07
26-ene-11	11 78710	32,2	38,8	17,01	0,99	0,82

Tabla 2: Valores de Coeficientes de Termo-referenciación y Corrección Histórica

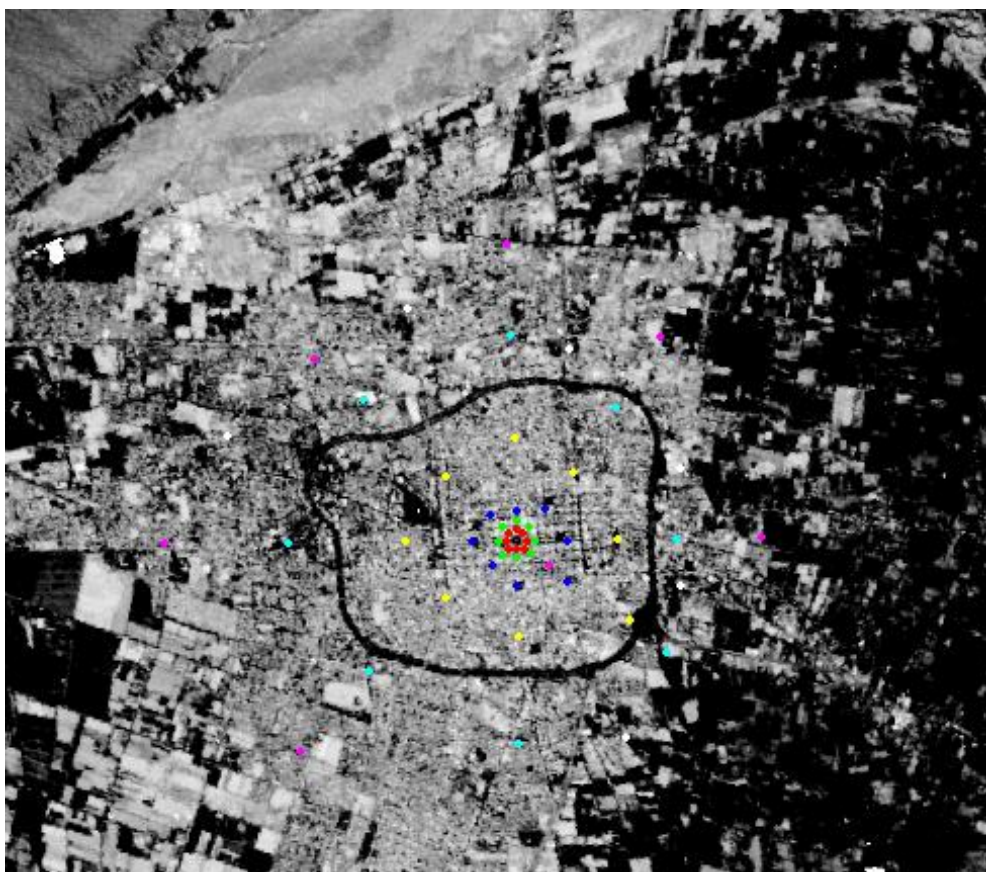


Figura 1: ROIs sobre imagen de temperatura del aire – Invierno 2011

## EXTRAPOLACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AIRE

La ICU se considera como la diferencia de temperatura promedio diaria entre la periferia no urbana y el centro urbano del asentamiento. La imagen satelital entrega información puntual y en este caso, (ver Tabla 1), el instante de toma de la imagen corresponde a las 14:30 HSV, aproximadamente a las 16:00 HOA, momento en que la diferencia de temperatura entre el centro urbano y la periferia No Urbana es mínima. A fin de salvar este desfase horario y dada la imposibilidad de obtener imágenes con horario de registro más cercanos a la hora 21:00, en que la temperatura se puede considerar como representativa del promedio diario, se utilizan los resultados de trabajos realizados con anterioridad (Cúnsulo, *et al* 2009), a fin de extrapolar los valores puntuales obtenidos mediante imágenes satelitales a valores promedios diarios.

En dichos trabajos, se determinaron las ICU para los años 2000, 2005 y 2009, utilizando datos provenientes de mediciones climáticas itinerantes tri-diurnas (9:00hs, 15:00hs y 21:00hs). Precisamente, en la hora central, la diferencia de temperatura centro-periferia es mínima coincidentemente con el horario de toma de la imagen satelital.

Debido a que el gradiente de temperatura ambiente es muy bajo en el período de tiempo que va de las 15hs a las 16hs, y ante la falta de datos más ajustados al horario de las 16:00hs, se asume que los registros de las 15:00hs son suficientemente adecuados para realizar la extrapolación necesaria.

A partir de los registros tridiurnos se calculan las diferencias de temperatura entre periferia y centro urbano correspondiente a las 15:00hs, para los años 2000, 2005 y 2009. A tal efecto se elaboran las isotermas de las 15:00hs y en base a éstas, se modeliza su comportamiento según las 8 direcciones cardinales principales. Posteriormente se calculan las diferencias de temperatura centro- periferia para cada nodo urbano, teniendo en cuenta los límites urbanos de cada año considerado.

Para cada nodo urbano se calcula el coeficiente de extrapolación como la relación entre el  $\Delta T_{15}$  °C (15:00hs) y el de  $\Delta T_{Prom}$  °C (Promedio diario) para luego aplicarlo en forma inversa a los valores obtenidos mediante las imágenes satelitales y obtener el

promedio diario a partir de los valores de las 16:00hs. En el caso de verano se calculó el promedio de las 4 imágenes disponibles.

### DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS URBANAS DEL GSJ

Las temperaturas del aire (T°C) obtenidas para los nodos urbanos sobre la trama urbana del GSJ, se procesaron con un software de interpolación de datos, para convertir la información puntual disponible en información continua más ajustada a la realidad y comparable con otros datos territoriales. Como resultado se obtuvieron las isolíneas de temperatura o *Isotermas Urbanas* para invierno y verano del año 2011, las que se muestran en las Figuras 2 y 3.

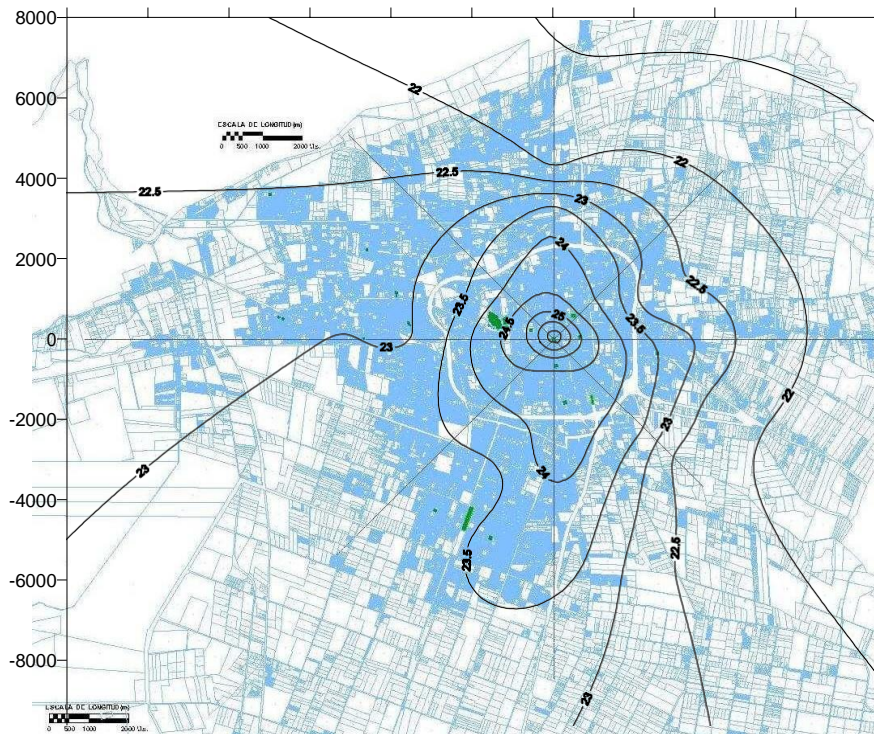


Figura 2: Isotermas de Invierno2011 para el Gran San Juan.

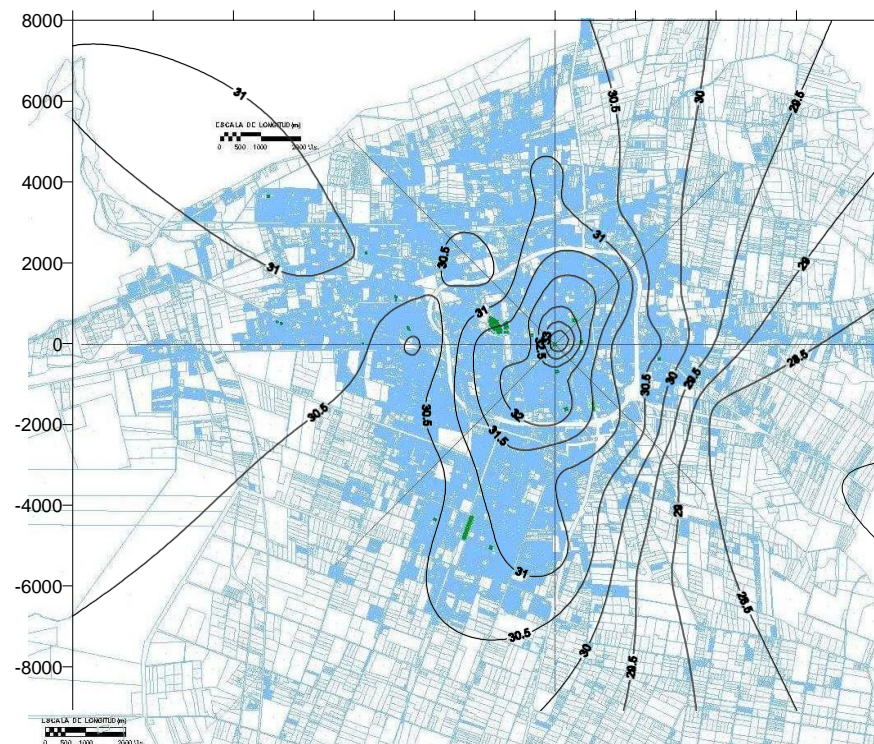


Figura 3: Isotermas de Verano2011 para el Gran San Juan

## OBTENCIÓN DEL LÍMITE URBANO

Para establecer la diferencia de temperatura entre el centro urbano y la periferia no urbana es necesario conocer el límite del área urbana. A tal fin se utiliza el índice urbanístico FOS (Factor de Ocupación del Suelo), el que representa la forma de ocupación superficial del territorio. Se realizó un relevamiento planialtimétrico de los Nodos urbanos citados, utilizando una base de datos adquirida a la Dirección de Geodesia y Catastro de la Provincia de San Juan actualizada al año 2012. La información en formato CAD se procesó para calcular las superficies de impronta edilicia en planta baja, las que se asumieron en el centro de cada Nodo. Estos valores permitieron calcular el FOS. Éstos se procesaron con un software de interpolación de datos que modeliza espacialmente la forma de distribución de este índice, sobre la trama urbana del GSJ, para convertir la información puntual disponible en información continua más ajustada a la realidad y comparable con otros datos territoriales. Este software genera un modelo en tres dimensiones, dos de las cuales (x e y) corresponden a las medidas (m) en el sentido NORTE-SUR y ESTE-OESTE respectivamente y la tercera dimensión (z) corresponde al índice urbanístico considerado. El modelo utilizado es el de base radial conforme la distribución de los Nodos Urbanos que conforman la base de datos.

Se ejecutaron cortes horizontales al modelo espacial con equidistancia conveniente y adecuada a las características escalares, obteniéndose isolíneas representativas del comportamiento espacial. En la Figura 4 se presentan las isolíneas de FOS con una equidistancia de 5%. La isolínea de FOS=5% representa el límite teórico espacial entre el área urbana y el área no urbana.

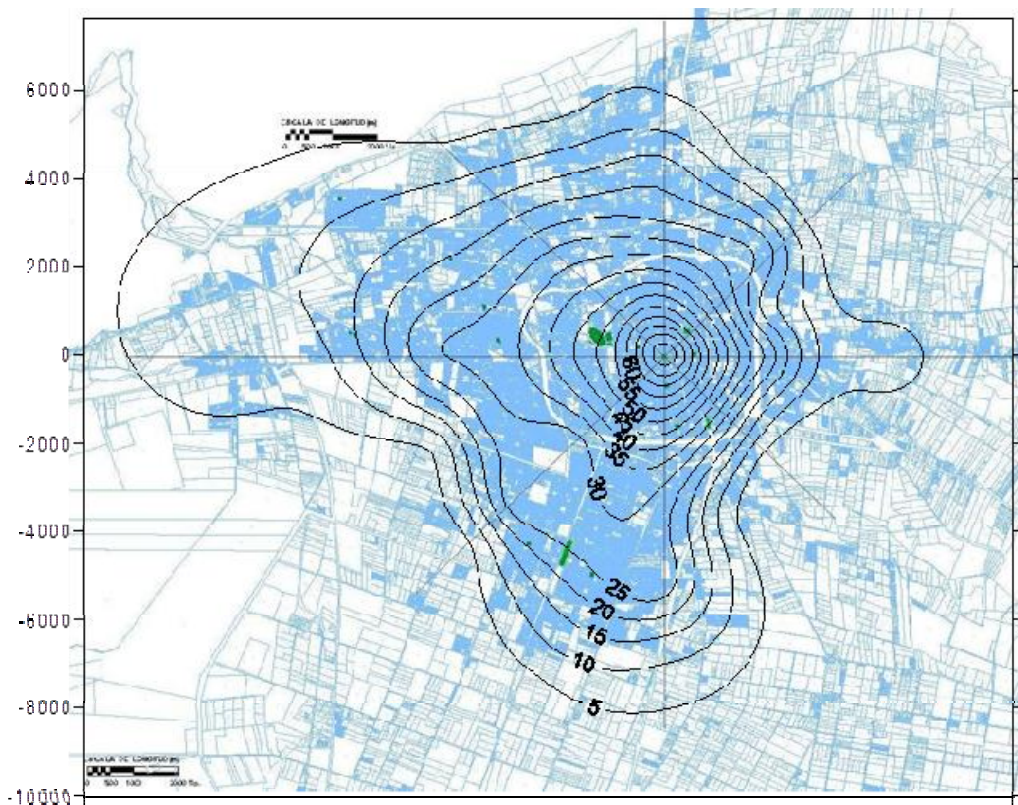


Figura 4: Isolíneas de FOS 2012 para el Gran San Juan

En las Figuras 5 y 6 las poligonales representan los límites de las Bandas Urbanas Características restituídos a la trama urbana del gran San Juan. Las mismas corresponden a:

Banda Eminentemente Urbana:	FOS $\geq$ 40%
Banda Urbana :	40% > FOS $\geq$ 20%
Banda Suburbana:	20% > FOS $\geq$ 5%
Banda No Urbana:	5% > FOS

## CÁLCULO DE DIFERENCIAS DE TEMPERATURA ENTRE PERIFERIA Y CENTRO URBANO

Tomando como base referencial el mismo soporte geométrico radial ya mencionado, se calcularon las diferencias de temperatura ( $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ) entre la 1ª isolínea de  $T^{\circ}\text{C}$  fuera del límite urbano y cada una de las isolíneas de  $T^{\circ}\text{C}$  interiores a ésta, medidas sobre el eje de cada orientación cardinal. Para ello se exportan los archivos de isoterma (Figuras 2 y 3) a formato DXF, para poder medir con un programa CAD los valores de las distancias entre el centro de coordenadas y la intersección de cada isoterma con los ejes cardinales principales para y ejecutar la modelización direccional. De esta manera se conforma un archivo base de datos con valores de posición de cada nodo urbano (x, y) y una tercera dimensión (z) a la cual se asigna el valor de  $T^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente se calcula la diferencia de temperatura ( $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ) entre el primer nodo fuera del límite urbano

(Temperatura No Urbana) y cada uno de los nodos urbanos interiores a dicho límite. Se genera así una base de datos con dos coordenadas espaciales y una tercera de  $\Delta T^{\circ}\text{C}$ , a partir de las cuales se genera un modelo de Isla de Calor.

La base de datos elaborada se procesó con un software de interpolación de datos, para convertir la información puntual disponible en información continua más ajustada a la realidad y comparable con otros datos territoriales. Haciendo cortes horizontales a los modelos, con la equidistancia conveniente a las características escalares de esta variable climática ( $0,5^{\circ}\text{C}$ ), se obtuvieron isóneas representativas de la forma de distribución de dichas diferencias, para *invierno* y *verano* para el año 2011, las que se muestran en las Figuras 5 y 6.

## ISLA DE CALOR INVIERNO 2011

Intensidad Máxima:  $4,5^{\circ}\text{C}$

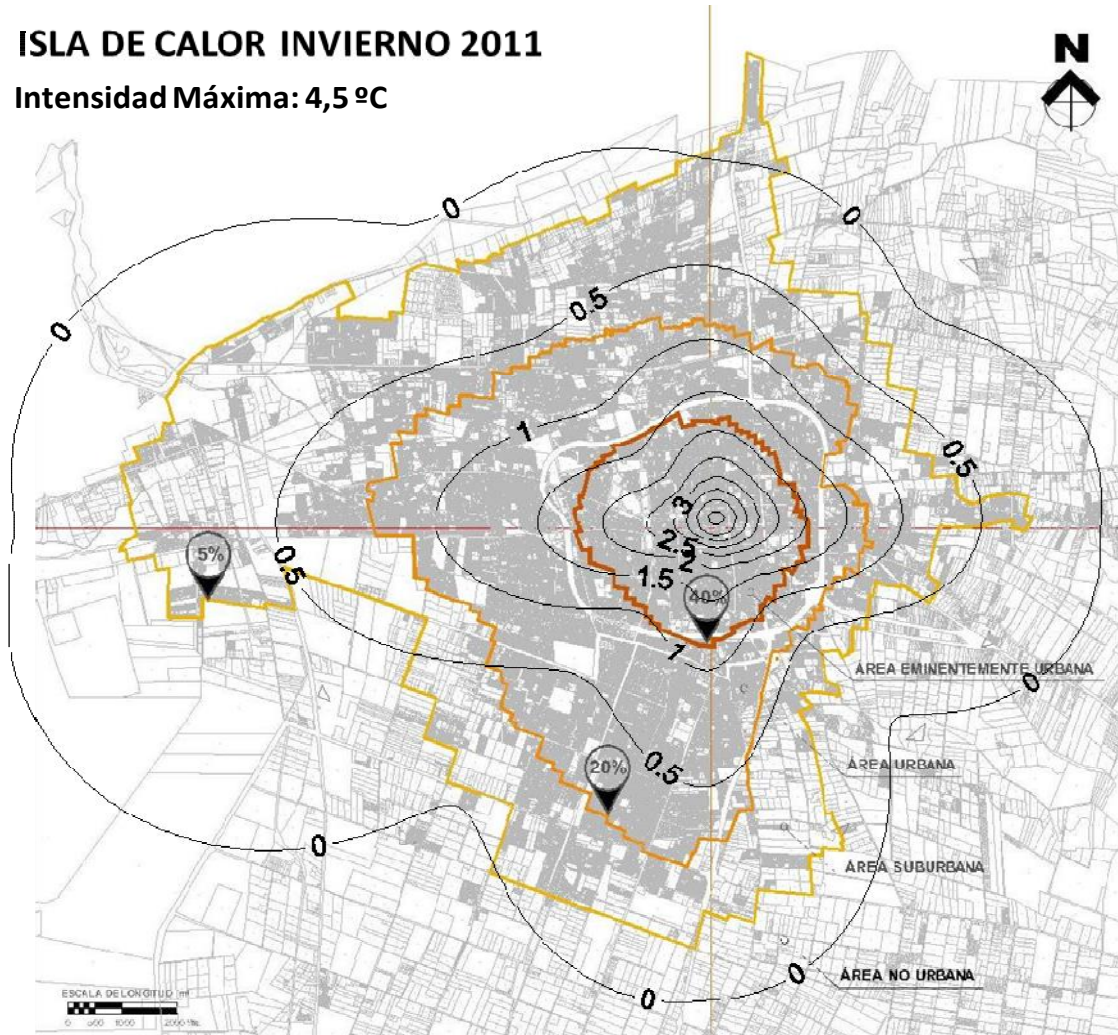


Figura 5: Isóneas de Isla de Calor para el G.S.J. Invierno 2011.

## ISLA DE CALOR VERANO 2011

Intensidad Máxima: 5,0 °C

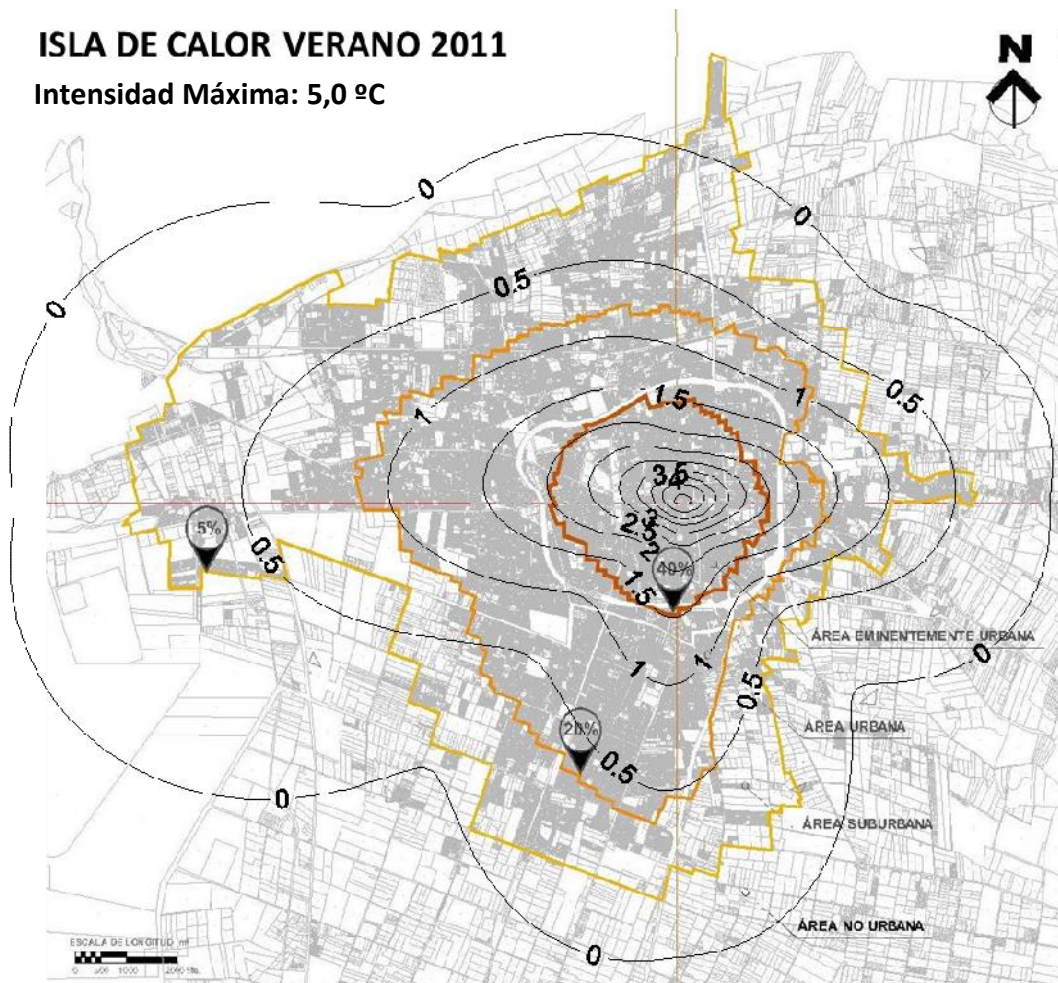


Figura 6: Isótermas de Isla de Calor para el GSJ. Verano 2011

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir del procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT 5TM+, se calcularon las intensidades máximas de la Isla de Calor, las que resultaron de 5,0°C para Verano y de 4,5 °C para Invierno. Los valores hallados con la metodología aplicada confirman los obtenidos en proyectos anteriores en los que se utilizaron datos de temperatura obtenidos *in situ*. Se concluye en consecuencia que es posible realizar estudios de temperaturas en espacios urbanos utilizando imágenes satelitales, las que resultan una excelente herramienta para obtención de datos temporalmente simultáneos, evitando las tediosas campañas de mediciones itinerantes cada vez más complejas y engorrosas debido al intenso tránsito vehicular. También se confirma que la mayor intensidad de Isla de Calor se produce en verano, al igual que en los estudios previos de Isla de Calor.

La búsqueda de imágenes satelitales adecuadas al objeto de estudio puede resultar dificultosa. Además no siempre es posible encontrar imágenes satelitales con las características necesarias que permitan estudiar el fenómeno de Isla de Calor. A esto se agrega que debe contarse complementariamente con datos de temperatura del aire registrados *in situ* para termo-referenciar los valores obtenidos a partir de las imágenes satelitales.

Del análisis establecido en la correlación que vincula a la Isla de Calor ( $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ), con la isólinea representativa del Límite Urbano, se concluye que presentan un patrón morfológico similar, correspondiéndose con el perfil externo de la trama urbana analizada, tanto para invierno como para verano. Esto demuestra la directa influencia que la urbanización ejerce sobre las variables del clima natural, ya que el comportamiento se mantiene en correspondencia según la dirección cardinal que se analice.

Estudiando la curva límite de la Isla de Calor ( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ ), que excede a la curva representativa del Límite Urbano en todas las orientaciones cardinales, se comprueba que el efecto térmico del área urbana no se limita sólo a su eje, sino que afecta a sus zonas perimetrales colindantes, extendiéndose más allá de la curva del límite urbano modelizado. Esta extensión del efecto se presenta con magnitudes diferentes según la dirección cardinal analizada. Se verifica el mismo comportamiento para invierno y verano.

## REFERENCIAS

- Chander G. and Markham B. L. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 11, pp. 2674–2677.
- Chander G., Markham B. L., Barsi J. A. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 490-494.
- Cotlier, C.; López, D.; Cornero, C. (2010). Apuntes del curso de Posgrado/Maestría en Ingeniería Vial “Los Sistemas de Información Geográfica y Teledetección: Geomática aplicada al uso urbano, regional y medio ambiente”, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina
- Cúnsulo, M., Papparelli, A., Kurbán, A., *et al* (2009). Variación Histórica de la Isla de Calor y de la Depresión Humídica Urbanas en Zona Árida, *AVERMA*, ISSN 0329-5184 Salta, Volumen 13, pp 11-93 a 11-100.
- Cúnsulo, M., Papparelli, A., Kurbán, A., (2012). Inferencia de la Temperatura del aire urbano a partir del “NDVI” utilizando Imágenes Satelitales, *AVERMA*, ISSN 0329-5184, Salta; Volumen 16, pp 11.01 a 11.07.
- Goetz, S. J.; Prince, S. D.; Small, J. (2000). Advances in Satellite Remote Sensing of Environmental Variables for Epidemiological Applications. *Advances in Parasitology*, Vol 41, pp 289–307.
- Goward, S. N.; Xue, Y.; Czajkowski, K. (1994). Ecological remote sensing at OTTER: macroscale satellite observations. *Ecological Applications* Vol. 4, pp 322- 343
- Jiménez-Muñoz J. C.; Sobrino J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, doi: 10.1029/2003JD003480. Un Método Monocanal Generalizado para Obtener la Temperatura de la Superficie Terrestre a partir de Datos de Teledetección

## ABSTRACT

The work presents results of a study conducted in the city of San Juan for the determination of the urban heat island (ICU) for winter and summer, continuing previous work that demonstrated the feasibility of using Landsat 5 TM + satellite images for the determination of the air temperature. The thermal data obtained from these images was referenced with hourly thermal data recorded at a weather station placed at the urban area. They were later extrapolated to move the record satellite hour from 16:00hs to 21:00hs HOA, time in which the center-periphery temperature difference is most representative of the ICU. The results showed 5.0 °C and 4.5 °C maximum intensity of the heat island for winter and summer respectively, values consistent with those obtained in previous projects which used temperature data recorded *in situ*.

On the other hand the ICU presents a morphological pattern similar to the urban limit, for both winter and summer, extending beyond the urban boundary, with different magnitudes according to cardinal directions.

**Keywords:** Urban air temperature, Remote sensing, Urban climate, Urban boundary.