

# EFFECTOS DE LA DINÁMICA URBANA SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN Y LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN, ARGENTINA.

Rosa OLTRA-CARRIÓ<sup>1</sup>, José A. SOBRINO<sup>1</sup>, Jorgelina GUTIERREZ-ANGONESE<sup>2</sup>,  
Antonela GIOIA<sup>2</sup>, Leonardo PAOLINI<sup>2</sup>, Agustina MALIZIA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València*

<sup>2</sup>*Instituto de Ecología Regional (IER). Universidad Nacional de Tucumán*

rosa.oltra@uv.es

## RESUMEN:

La urbanización del planeta implica un cambio importante en los usos del suelo y, consecuentemente, de las propiedades térmicas de las superficies terrestres. En este trabajo se analiza el impacto de la urbanización en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). Se estudia el tipo de vegetación que se recupera en la zona tras el proceso de construcción de la ciudad, la transición de vegetación natural a vegetación de parques y jardines. Además se analiza, a través de imágenes de satélite, la temperatura de las superficies de la zona en estudio, relacionándose los patrones térmicos con las zonas vegetadas de la ciudad. A partir de la temperatura de superficie se calcula el valor de la Isla de Calor Urbana Superficial que, calculada para imágenes diurnas, da valores negativos para finales de invierno y primavera, y positivos para el verano. También a través de las imágenes de satélite se obtiene el aumento de la zona construida entre los años 1992 y 2008 se observa un incremento de la superficie urbana del 66%. Finalmente, se presenta un modelo que podrá ayudar a planificar y afrontar el crecimiento urbano y el consecuente cambio que éste provoca en los patrones térmicos de la zona y en su vegetación.

**Palabras Clave:** Isla de Calor Urbana, Vegetación urbana, San Miguel de Tucumán, Teledetección.

## ABSTRACT

The urbanization of the planet involves an important change in the soil uses. Therefore, thermal properties of the surfaces have changed. In this work the impact of the urbanization is analyzed in the Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). It is studied the change from natural vegetation cover to urban vegetation as squares or gardens. Moreover, satellite images are used to study the surface temperature, and it is observed that the thermal patterns are connected with the vegetated areas in the city. Land surface temperature is used to measure the value of the Surface Urban Heat Island. This phenomenon is measured using daytime images, negative values are obtained in winter and spring while positive values for summer time. The growing of the built area is monitored with satellite images observing an increase of the urban area of the 66% between year 1992 and year 2008. Finally, an urban growing model is presented; this would help to plan and face up the urban growing and changes in thermal patterns and vegetation.

**Keywords:** Urban Heat Island, Urban vegetation, San Miguel de Tucumán, Remote Sensing.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las urbanizaciones son consideradas una de las formas más extremas de alteración del uso de la tierra y una de las modificaciones más persistentes e importantes de los cambios producidos por las personas. El impacto de los procesos urbanizadores sobre los ecosistemas naturales y sobre la calidad del hábitat es desconocido. La relación entre la dinámica urbana y la dinámica de las comunidades vegetales implica procesos con características complejas y muchas veces no lineales. A medida que la urbanización avanza, la vegetación natural es eliminada. Más tarde, el área urbana recupera parte de la vegetación, aunque ahora formada por una nueva comunidad, mezcla de especies autóctonas y exóticas principalmente ornamentales. La formación de esta nueva comunidad vegetal asociada a áreas urbanas puede ser entendida como un proceso de transición urbana, donde la vegetación preexistente es reemplazada por una nueva vegetación con características funcionales y estructurales diferentes. Uno de los efectos más importantes que tiene esta nueva vegetación es la regulación de la temperatura de las áreas urbanizadas. Este proceso de refrigeración se debe no sólo a la intercepción de la radiación solar por parte de la vegetación (lo cual disminuye el sobrecalentamiento de las construcciones urbanas) sino también a los procesos de evapotranspiración llevados a cabo por las plantas, lo que ayuda a reducir la temperatura del aire. El grado de presencia y las características estructurales y funcionales de la vegetación urbana pueden condicionar en gran medida el fenómeno conocido como Isla de Calor Urbana (ICU). Este fenómeno se caracteriza por el calentamiento de las zonas urbanas en comparación a sus alrededores no urbanizados. El balance entre costos y beneficios de la construcción requiere de un análisis de los cambios ecológicos y del modelado de posibles escenarios futuros basado en modelos espacialmente explícitos de la dinámica urbana. Estudiar los patrones y procesos que ocurren en un área urbana revela un mosaico dinámico entre gente y naturaleza. Comprender las relaciones entre la dinámica urbana, la dinámica de la vegetación asociada y la temperatura de superficie nos permitirá mejorar nuestro entendimiento sobre los efectos de las futuras urbanizaciones. En este trabajo se presenta un análisis preliminar de la relación entre la dinámica de urbanización, la dinámica vegetal asociada y sus efectos sobre los patrones de temperatura de superficie en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina).

## 2. LUGAR DE ESTUDIO

La Provincia de Tucumán se encuentra en el Noroeste de Argentina. El estudio se centra en el Gran San Miguel de Tucumán (GSMT) que es el aglomerado urbano formado alrededor de la ciudad de San Miguel de Tucumán. El GSMT se encuentra a los pies de la Sierra de San Javier (SSJ), en su vertiente este, y presenta una dinámica de uso de la tierra caracterizada por la reducción de las áreas agrícola-ganaderas y una expansión de las áreas urbanas, asociado al marcado crecimiento poblacional. Durante las últimas cuatro décadas el GSMT ha triplicado su población, conformando el núcleo urbano más importante del Norte de Argentina, con una población de más de 1.5 millones de habitantes. Esto ha generado cambios importantes en los patrones de uso del suelo, por un lado incrementando la densidad de construcciones en el centro de la ciudad y por otro expandiendo su área urbana hacia la periferia. La mayor expansión se ha localizado en su sector oeste, más cercano a la SSJ, y donde se sitúa el núcleo urbano de Yerba Buena.

### 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El análisis de la relación entre la creciente construcción, la vegetación urbana y los patrones de temperatura requieren de un estudio previo en el que cada factor sea analizado. Estas reflexiones y resultados preliminares son los que se presentan a continuación.

#### 3.1. Obtención de mapas de temperatura superficial

Se han elaborado mapas de temperatura superficial terrestre (TST) de la zona del Gran San Miguel de Tucumán a partir de imágenes Landsat TM, siguiendo la metodología propuesta por JIMÉNEZ-MUÑOZ *et al.* (2009). El algoritmo monocanal utilizado viene descrito en la ecuación 1.

$$TST = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (1)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie, calculada según el método simplificado del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (SOBRINO *et al.*, 2008);  $L_{sen}$  la radiancia medida por el sensor;  $\gamma$  y  $\delta$  son parámetros que dependen de la temperatura a nivel del sensor, de  $L_{sen}$  y de la longitud de onda del canal;  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  y  $\psi_3$  son las llamadas funciones atmosféricas y se han tomado como:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad \psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad \psi_3 = L^\downarrow \quad (2)$$

Donde  $\tau$  es la transmisividad de la atmósfera,  $L^\downarrow$  la radiancia descendente y  $L^\uparrow$  la radiancia ascendente. Estos tres parámetros se han obtenido de productos MODIS de la zona, más concretamente del producto MOD07.

En la figura 1 se puede observar un ejemplo de las imágenes de temperatura obtenidas. En ella se aprecia perfectamente la diferencia de temperatura entre la zona urbana (temperatura mayor) y la zona no urbana. Además se pueden diferenciar las zonas de parques con vegetación dentro del casco urbano, debido al contraste de temperatura, estas aparecen señaladas con sendas flechas en la figura. La zona de más baja temperatura, a la izquierda de la imagen, corresponde a la SSJ.

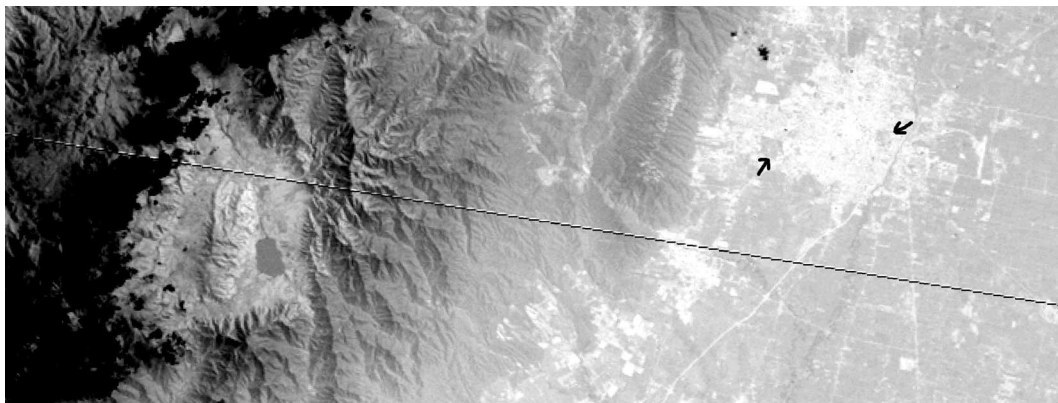


Fig. 1. Imagen de TST del día 28 de febrero de 2008 de la zona del Gran San Miguel de Tucumán. Las zonas señaladas con una flecha corresponden a zonas ajardinadas de la ciudad.

A partir de las imágenes de TST, se ha obtenido el valor de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS), definida según la ecuación (3) como la diferencia entre la temperatura media de la zona urbana y la temperatura media de la zona no urbana. Este efecto sería el análogo al fenómeno atmosférico de la ICU, donde hablamos de temperatura del aire, sólo que en el caso de la ICUS se trata de un efecto superficial y se trabaja por tanto con la TST

$$ICUS = TST_{urbana} - TST_{no-urbana} \quad (3)$$

La zona urbana se ha limitado siguiendo los límites cartográficos de los núcleos urbanos. Mientras que la zona no urbana se ha tomado como el resto de la imagen que no pertenece a zona urbana ni a zona montañosa. El valor de la ICUS se ha calculado para un recorte de las imágenes LANDSAT, la porción de imagen elegida se muestra en la figura 2, donde además, se observa la zona correspondiente en la que se puede apreciar el límite entre lo urbano y lo rural.



Fig. 2. Zona de estudio para determinar la ICUS, las zonas consideradas como urbanas están rodeadas con una fina línea negra.

El resultado de la ICUS obtenido se puede observar en la figura 3. Las imágenes LANDSAT están tomadas todas a la misma hora (14:00 UTC), por tanto, los cambios que observamos en la gráfica corresponden a cambios estacionales y no por horario del día. En otros trabajos y en experiencias de campo en otras ciudades como por ejemplo Madrid (SOBRINO *et al*, 2009a y SOBRINO *et al*, 2009b), queda demostrado que el fenómeno de la ICUS se observa mejor de

noche, debido al enfriamiento más rápido que sufren las superficies rurales respecto a las urbanas. Mientras que de día se obtiene una ICUS fría, es decir, que la zona no construida presenta temperaturas mayores que las que sí que lo están. El valor de la ICUS se ve pues fuertemente influenciado por las características de las zonas circundantes a la ciudad, que en el caso de Madrid son más áridas que en el caso de Tucumán. Los cultivos que rodean el GSMT son cítricos y caña de azúcar, así, la fenología del cultivo de caña de azúcar influirá fuertemente en el valor de la ICUS. Si observamos la figura 3 vemos que dependiendo de la estación del año se pasa de una ICUS fría a una ICUS caliente. Los meses de septiembre, octubre y noviembre, la  $ICUS < 0$ , debido a que la porción de suelo desnudo en cada píxel de plantación de caña de azúcar es mayor que en los meses de enero, febrero y marzo, donde la temperatura urbana es mayor que la rural, con más presencia de vegetación.

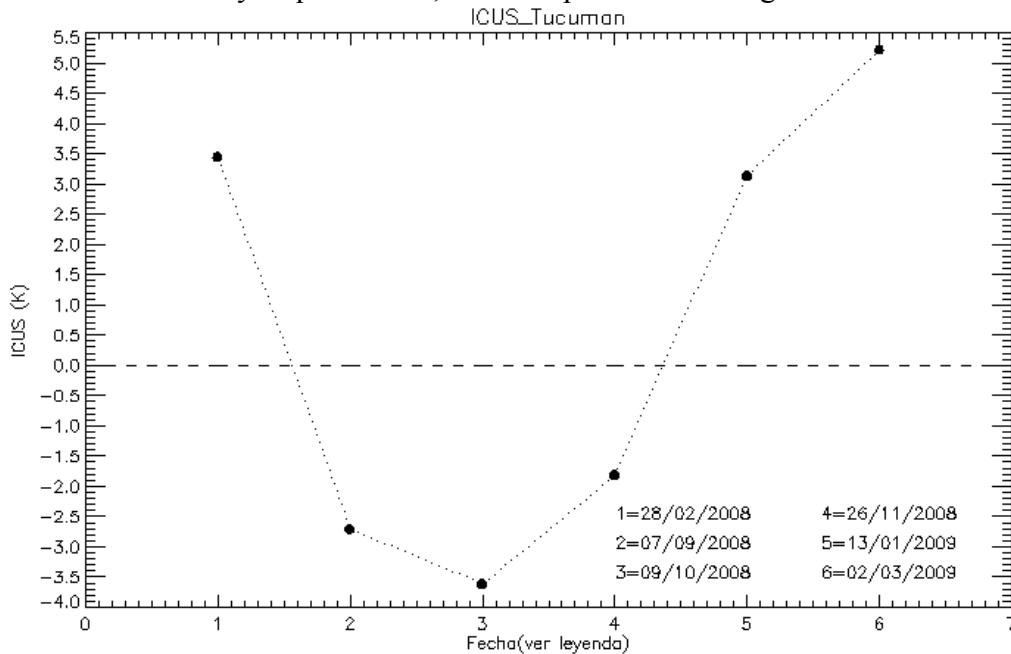


Fig. 3. ICUS calculado con las imágenes trabajadas del año 2008 y 2009.

### 3.2. Reconstrucción de la dinámica de la vegetación urbana.

Para analizar la relación entre estructura y composición de la vegetación a lo largo del gradiente de urbanización San Miguel de Tucumán-Yerba Buena-SSJ y su relación con los valores de Temperatura de Superficie se ha trabajado en 19 plazas ubicadas a lo largo del gradiente, siendo estos sitios representativos del arbolado público.

Se han utilizado parámetros estructurales medidos in situ como la cobertura vegetal, el área basal, y la densidad de vegetación. Además se han obtenido datos de superficie de cobertura vegetal y superficie de cemento, utilizando la aplicación *Google Earth Pro.*, además de variables complementarias como la distancia a la SSJ y la antigüedad de las plazas.

Los parámetros ambientales considerados para el estudio han sido el NDVI calculado a partir de imágenes Landsat TM y para la temperatura de superficie se han utilizado las imágenes de TST obtenidas en el subapartado anterior.

Para describir la estructura del arbolado urbano a lo largo del gradiente se han realizado análisis de correspondencia corregido (DCA) y análisis de componentes principales (PCA) para cuantificar gradientes a lo largo de las 19 plazas, basados en las variables estructurales y ambientales. Para relacionar las variables estructurales del arbolado urbano, las variables

ambientales y las variables complementarias se han utilizado correlaciones de Pearson entre dichos parámetros y los scores de las plazas sobre los ejes del PCA.

Lo que muestra el análisis es que el arbolado urbano representado en las plazas posee una composición simplificada, fuertemente dominada por pocas especies, entre ellas *Citrus* sp, *Tabebuia impetiginosa*, *Jacaranda mimosifolia* y *Fraxinus* sp; con alta proporción de individuos para estas especies. Estos resultados sugieren que a escala local la urbanización tiende a homogeneizar la comunidad de plantas. Además, como consecuencia de la intervención antrópica en el ajardinamiento de las plazas, se observa en los resultados una proporción casi igual de especies exóticas y nativas.

Las plazas del centro de San Miguel de Tucumán, que en este estudio representa la zona más densamente urbanizada, se encuentran más alejadas de la Sierra de San Javier, son más antiguas, presentan mayor porcentaje de superficie construida y se registra un aumento en la temperatura de superficie, en comparación con aquellas ubicadas en Yerba Buena. Mientras que las plazas ubicadas en la localidad de Yerba Buena (zona menos densamente urbanizada del estudio) revelan mayor porcentaje de superficie verde, más cobertura vegetal y área basal (la mayoría) y valores más altos del índice de vegetación NDVI. Por lo tanto, existe una relación positiva entre la cobertura vegetal del arbolado urbano y el NDVI; y por otro lado, esa cobertura se relaciona negativamente con la temperatura de superficie por lo cual se confirma que al haber mayor vegetación existe mayor evapotranspiración y más sombra, lo que contribuye a disminuir el sobrecalentamiento de las estructuras urbanas.

### **3.3. Elaboración de mapas de ocupación del territorio**

Se han obtenido mapas de suelo urbanizado para el área metropolitana del GSMT a partir de imágenes del satélite Landsat TM de los años 1992, 2000 y 2008. La clasificación se hizo utilizando el procedimiento Random Forest (BREIMAN, 2001).

A partir de estos mapas se ha obtenido la superficie urbana en cada fecha y se ha estimado el cambio en la superficie urbanizada mediante comparación de las clasificaciones individuales por tabulación cruzada, identificando además las áreas de cambio

En la figura 4 se muestra el resultado de todo este procedimiento. Se observa un notable crecimiento de la zona urbana del GSMT, pasando de una superficie urbanizada de aproximadamente 9460 ha en el año 1992 a 12270 ha en el año 2000 y 15685 ha en el año 2008. Estos valores implican un aumento de la zona urbanizada del 66% entre 1992 y 2008. Las principales áreas de expansión fueron hacia el oeste y sudoeste del Municipio de Yerba Buena, al pie de la Sierra de San Javier, y hacia la región este, al sur de Banda de Río Salí y noreste de Alderete.

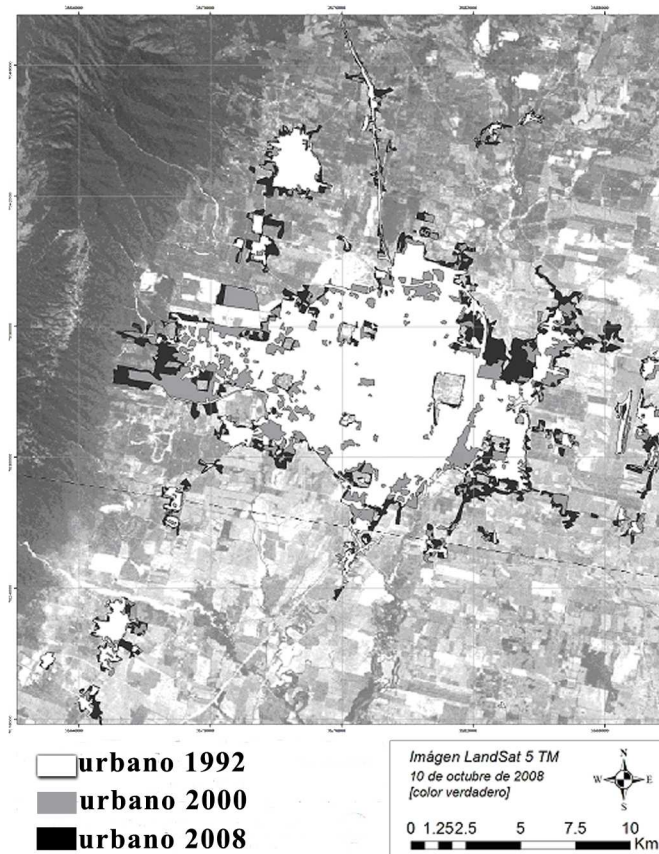


Fig. 4. Cambios en la zona urbanizada del GSMT en los años 1992, 2000 y 2008.

### 3.4. Explorando el desarrollo de un modelo dinámico-espacial.

Como ya se ha dicho anteriormente, los cambios en la superficie urbanizada en la zona de estudio, han estado dominados por el crecimiento del Gran San Miguel de Tucumán, tanto a nivel de expansión espacial, como a nivel de su importancia político-económica dentro de la provincia de Tucumán y el Noroeste de Argentina. La expansión urbana sigue patrones espaciales diversos generalmente controlados por condiciones del medio físico (ej, topografía) y por factores sociales y económicos (e.g. red de transporte, precio del suelo, legislación, demografía) que interactúan entre sí (ANTROP, 2004). El desarrollo de los SIG y nuevas técnicas de análisis espacial facilita la representación, análisis y modelado de sistemas dinámicos complejos en el espacio, como las áreas urbanas, permitiendo la explicación, predicción y la identificación de factores determinantes del tipo de ocupación (AGUILERA-BENAVENTE, 2006).

A partir de los mapas urbanos obtenidos se ha construido un modelo de ocupación óptima del suelo, mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) (GÓMEZ-DELGADO y BARREDO, 2005), el cual ha permitido proyectar áreas de crecimiento futuro deseable para el Gran San Miguel de Tucumán y alrededores, bajo diferentes escenarios económicos, sociales y ambientales.

Para construir el modelo se ha realizado una selección de variables espaciales intervinientes en el crecimiento urbano del área de estudio (factores) y se ha realizado un análisis de correlación entre dichos factores para encontrar cuáles se encuentran espacialmente correlacionados, simplificando así el modelo a aquellos factores que realmente contribuyen a la explicación del crecimiento urbano. Los factores finalmente incluidos han sido: pendiente, uso del suelo, proximidad a la red de transporte, a los núcleos urbanos, centros educativos y

de salud, red hidrográfica, áreas protegidas e instalaciones no deseables. Además se han incluido una serie de restricciones, es decir, zonas donde el establecimiento urbano es imposible bajo las condiciones actuales (zonas actualmente urbanizadas, red de carreteras o el parque biológico SSJ).

Los factores y restricciones han sido finalmente combinados aplicando una sumatoria lineal ponderada. La ponderación de los factores se ha realizado mediante la técnica de comparación por pares de Saaty y su posterior normalización mediante operadores borrosos (fuzzy). Como resultado se han obtenido mapas de adecuación para uso urbano (variable continua), en el que se otorga a cada píxel un valor de capacidad de acogida según una determinada combinación de factores (escenarios), con sus respectivos pesos, estando aquí representadas las áreas que reúnen las condiciones adecuadas para el futuro establecimiento de áreas urbanas. A partir de dichos mapas se han extraído las áreas con mayor aptitud para uso urbano considerando como meta de superficie el crecimiento real estimado entre 2000 y 2008 (3411 ha) y se ha comparado con el crecimiento urbano real experimentado en dicho período.

En la figura 5 se muestran las áreas con mayor valor de adecuación según una mayor ponderación de los factores económicos y sociales. Como puede observarse, según los factores analizados, las áreas que reúnen las condiciones adecuadas para uso urbano se localizan al este del GSMT y este de Tañí Viejo.

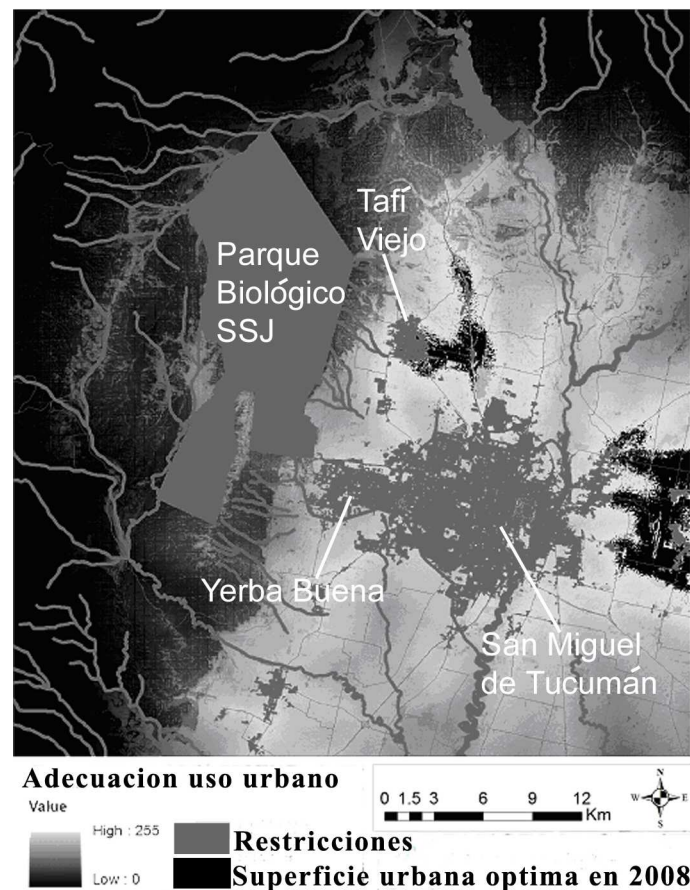


Fig. 5. Mapa de adecuación para uso urbano según el modelo utilizado.



#### 4. CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes de TST nos ha permitido estudiar el cambio térmico de las diferentes superficies que constituyen el GSMT a lo largo del año. Este cambio en los patrones de temperatura debido a la construcción, se ha cuantificado a partir de la ICUS. Teniendo en cuenta que todas las imágenes son de las 14:00 hora UTC (hora de paso Landsat sobre la zona), los cambios en el valor de la ICUS serán debidos a la diferente estación del año y a la fenología de los cultivos que rodean la ciudad, como la caña de azúcar. Se ha obtenido un valor de ICUS  $< 0$  para finales de invierno y primavera (septiembre, octubre y noviembre) y un ICUS  $> 0$  para los meses de verano (enero, febrero y marzo).

De forma complementaria, el análisis de los patrones de vegetación asociados al proceso de expansión urbana a lo largo del gradiente urbano-rural bajo estudio, muestra el papel central que juega la estructura de la vegetación a la hora de mitigar los efectos de la ICUS.

La información obtenida puede servir para alimentar modelos dinámicos espacialmente explícitos que permitirán generar escenarios futuros realistas con los cuales enfrentar el crecimiento urbano durante el próximo siglo y estudiar el cambio climático local y la ecología urbana.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo (AECID), bajo el proyecto A/018766/08-Efectos de la dinámica urbana sobre la estructura de la vegetación y la temperatura de superficie del Gran San Miguel de Tucumán. Este trabajo se llevó a cabo mientras R. Oltra-Carrió disfrutaba de una beca predoctoral *V Segles* de la Universitat de València.

#### 6. REFERENCIAS

AGUILERA-BENAVENTE, F. (2006). "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares". *GeoFocus* 6, pp. 81-112.

ANTROP, M. (2004). "Landscape change and the urbanization process in Europe". *Landscape and Urban Planning* 67, pp. 9-26.

BREIMAN, L. (2001). Random Forest. *Machine Learning*, 45:5-32

GIOIA, A. (2010). *Influencia de la estructura y dinámica de la vegetación sobre la temperatura de superficie a lo largo un gradiente urbano-rural en el Gran San Miguel de Tucumán, Argentina*. Tesis de grado en proceso, Universidad Nacional de Tucumán.

GÓMEZ-DELGADO, M. y BARREDO, J.I. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial Ra-Ma, 2º Edición. Madrid, España.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., CRISTÓBAL, J., SOBRINO, J.A., SÒRIA, G., NINYEROLA, M. y PONS, X. (2009). "Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data". *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.47 (1), pp. 339-349.

SOBRINO, J.A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., SÒRIA, G., ROMAGUERA, M., GUANTER, L., MORENO, J., PLAZA, A. y MARTÍNEZ, P. (2008). "Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors". *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol 48 (2), pp. 316-327

SOBRINO, J. A., BIANCHI, R., PAGANINI, M., SÒRIA, G., JIMENEZ-MUNOZ, J. C., OLTRA-CARRIÓ, R., MATTAR, C., ROMAGUERA, M., FRANCH, B., HIDALGO, V., CUENCA, J., JULIEN, Y., ATITAR, M., FERNÁNDEZ-RENAU, A., GOMEZ, J. A., DE MIGUEL, E., GUTIÉRREZ DE LA CÁMARA, O., JIMÉNEZ, M., PRADO, E., RODRÍGUEZ-CANTANO, R., RUIZ, I., NERRY, F., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P. P., PUJADAS, M., MOLERO, F., MORENO, J., ALONSO, L., FERNÁNDEZ, F., GALÁN, E., CAÑADA, R., ROMERO, J. M., CALPE-MARAVILLA, J., CAMPS-VALLS, G., BOSCH-MAGRANER, M., PUENTE-ROBLES, R., CORDERO-SALVADOR, J., TORRES-CARRERO, J., DUQUE-CUESTA, M. A., MOYA, F., LABAJÓ, A., LABAJÓ, S., HIDALGO-RODRÍGUEZ, J., ACERO, J. A., HERNÁNDEZ-MARTÍN, E., MARTILLI, A., SALAMANCA, F., GIMENO-PRESA, L. y PIGEON, G. (2009a). *Dual-use European Security IR Experiment 2008 (DESIREX 2008) Final Report*. Frascati (Italy): European Space Agency.

SOBRINO, J. A., SÒRIA, G., OLTRA-CARRIÓ, R., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., ROMAGUERA, M., CUENCA, J., HIDALGO, V., FRANCH, B., MATTAR, C., JULIEN, Y., BIANCHI, R., PAGANINI, M., MORENO, J. F., ALONSO, L., FERNÁNDEZ-RENAU, A., GOMEZ, J. A., DE MIGUEL, E., GUTIÉRREZ, O., JIMÉNEZ, M., PRADO, E., RODRÍGUEZ-CANTANO, R., RUIZ, I., NERRY, F., NAJJAR, G., KASTENDEUCH, P. P., PUJADAS, M., MOLERO, F., MARTILLI, A., SALAMANCA, F., FERNÁNDEZ, F., GALÁN, E., CAÑADA, R., HERNÁNDEZ, E., HIDALGO, J., ACERO, J. A., ROMERO, J. M., MOYA, F. y GIMENO, L. (2009b). "DESIREX 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid". *Revista de Teledetección*, 31, 80-92.