

# Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales modis

Leonardo Paolini

*Instituto de Ecología Regional, UNT-CONICET, CC 34, 4107, Tucumán Argentina*

## Resumen

El crecimiento urbano modifica drásticamente los patrones espaciales de cobertura natural. El reemplazo de estas coberturas por superficies impermeables alteran los flujos de energía, generando la formación de «Islas de calor» en las áreas con mayor densidad de edificaciones. En la actualidad la dinámica del crecimiento urbano está asociada a procesos de expansión de las ciudades hacia áreas periféricas. Esto produce cambios significativos y acelerados de la cobertura del suelo, incrementando la superficie impermeable con posibles efectos sobre el clima local.

El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta de la temperatura de superficie (TS) ante los procesos de crecimiento urbano, tomando como modelo el conglomerado urbano del Gran San Miguel de Tucumán en el Noroeste de Argentina. Mediante el análisis de series temporales de TS, derivada de imágenes MODIS, se reconstruyó la variación de temperatura entre 2000 y 2010 (diurna y nocturna) asociada a los procesos de densificación y expansión urbana. El aumento de la TS diurna se encuentra más fuertemente asociada con los procesos de expansión urbana, mientras que el aumento de la TS nocturna está asociado más fuertemente con los procesos de densificación urbana. Estos resultados muestran el gran impacto que tienen los procesos de expansión urbana sobre los flujos de energía y la fuerte asociación que existe entre densidad de construcciones y la temperatura nocturna, una característica típica de la formación de «islas de calor urbanas». Debido a que la TS responde de forma directa e inmediata a los cambios en los patrones espaciales de cobertura del terreno, representa un dato central en los análisis de crecimiento urbano y cambio climático asociado a las ciudades. El acelerado proceso de urbanización de la población mundial necesita de este tipo de análisis para poder comprender las relaciones entre urbanización, cambio de uso del suelo y cambio climático con el objetivo de planificar el futuro de las ciudades bajo diferentes escenarios.

**Palabras clave:** urbanización, temperatura de superficie, MODIS, análisis de series temporales, expansión.

## Abstract

### Land surface temperature response to urban growth using modis time series analysis

Urban growth drastically changes the spatial patterns of natural cover. Replacement of natural land cover by impervious surfaces alters the energy flows, promoting «heat islands» formation in the areas with the highest density of buildings. At present, urban growth dynamic is associated with sprawl into outlying areas. This produces significant and rapid changes in land cover, increasing impervious surface with possible effects on the local climate.

The objective of this paper is to determine the response of the surface temperature (ST) to urban growth processes, using Gran San Miguel de Tucumán metropolitan area, in Northwestern Argentina, as a study case. By analysing time series ST, derived from MODIS images, I have reconstructed temperature variation between 2000 and 2010 (day and night) associated with the processes of densification and urban expansion. Increase in daytime ST is more strongly associated with urban expansion, while the increase in nocturnal ST is associated more strongly with urban densification processes. These results show the great impact of urban expansion processes of energy flows and the

\* Autor para la correspondencia: leopaolini@gmail.com  
Recibido: 11-09-12; Aceptado: 19-11-12.

strong association between building density and night temperatures, a typical characteristic of the formation of «urban heat islands». Because ST responds directly and immediately to changes in the spatial patterns of land cover and represents a central factor in the analysis of urban growth and climate change associated with cities. The rapid urbanization of the world population needs this type of analysis in order to understand the relationships between urbanization, land use change and climate change in order to plan the future of cities under different scenarios.

**Key words:** urbanization, surface temperature, MODIS, time series analysis, sprawl.

## Introducción

El cambio climático y el cambio de uso del suelo son los dos principales componentes del cambio ambiental global en ecosistemas terrestres (Vitousek *et al.* 1997, Sala *et al.* 2000). Dentro de estos procesos, la urbanización es una de las formas más extremas de alteración del uso del suelo y una de las modificaciones más persistentes de los cambios producidos por el hombre (Palomino y Carrascal 2006, Shochat *et al.* 2006, McKinney 2006). En general, la expansión urbana provoca la remoción total de la cobertura preexistente y su reemplazo por nuevas superficies, típicamente impermeables, lo que altera los flujos de materia y energía y modifica las tasas de intercambio de calor sensible (calor transferido a la atmósfera) y calor latente (empleado por el agua en la evaporación para cambiar de estado) (Weng *et al.* 2003). De esta manera se forman áreas de mayor temperatura conocidas como «islas de calor urbano (ICU)», características del centro de las ciudades, directamente relacionadas con una mayor densidad de edificaciones (Oke 1982, Oke 1997, Pickett *et al.* 2001, Jenerette *et al.* 2007).

En la actualidad, la población humana está experimentando un cambio significativo hacia una forma de vida predominantemente urbana (Grimm *et al.* 2008). Desde el año 2008 más del 50% de la población mundial (3,2 mil millones de personas) vive en zonas urbanas. Para el año 2030, se estima que unas cinco mil millones de personas (60% de la población mundial) vivirán en zonas urbanas (Mills 2007). La mayor parte de este incremento ocurrirá en las áreas urbanas de tamaño intermedio (1-3 millones de hab.) de países en vías de desarrollo (UNFPA 2011). La cobertura global de áreas urbanas se incrementará desde 605.000 km<sup>2</sup> en 2000 a poco más de 1.900.000

km<sup>2</sup> en 2050 (Angel *et al.* 2010, Angel *et al.* 2011), lo que significa la triplicación del área urbana a nivel mundial en solo 50 años. Este crecimiento urbano, presenta una dinámica de uso de la tierra caracterizada por una expansión de las áreas urbanas hacia áreas agrícola-ganaderas periféricas y una disminución en la densidad de construcciones como consecuencia del aumento del poder adquisitivo de los sectores sociales medios y altos, lo que genera un patrón de ocupación urbana del suelo de baja densidad (Glaeser 2011). Esta nueva dinámica de urbanización puede iniciar ciclos de retroalimentación positiva a través del reemplazo de la cobertura natural por nuevas superficies impermeables. Esto puede producir cambios sensibles en los flujos de energía, modificar el clima a escala local y producir un aumento en el consumo energético para refrigeración, lo que aumentaría la emisión de calor, y llevaría a los habitantes a buscar nuevos lugares de vivienda en la periferia, retroalimentando el proceso. El sistema podría entrar en un ciclo de expansión urbana-calentamiento-consumo energético-más calentamiento-más expansión urbana, con consecuencias poco predecibles para los habitantes de las ciudades.

Aunque el área urbanizada cubre menos del 2% de la superficie de las masas terrestres del planeta, y los procesos de urbanización son más evidentes a escala local (reemplazo de la vegetación por superficies impermeables y formación de las «islas de calor urbana») el impacto de las ciudades es global, ya que se apropian de buena parte de la productividad de los ecosistemas naturales y emiten desechos producto de su «metabolismo» (Alberti 2005). Las ciudades son responsables directa e indirectamente, de gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>, por industria, transporte y consumo energético (Glaeser 2011).

La temperatura de superficie (TS) responde de forma directa a los cambios en los patrones espaciales de cobertura del suelo (Oltra-Carrió *et al.* 2010). Los registros de TS derivados de sensores remotos pueden ser de gran utilidad para analizar los patrones de expansión urbana y su impacto sobre la dinámica térmica, de forma espacialmente explícita. En general, los estudios de este tipo analizan la relación entre los cambios de cobertura y la TS a partir de datos satelitales puntuales en el tiempo (una o pocas imágenes por año) (Oltra-Carrió *et al.* 2010, Jenerette *et al.* 2007). Si bien esta es una aproximación valiosa en cuanto a la información que aporta y con una relación costo/beneficio óptima, no contempla las variaciones temporales intra-anales en los patrones de TS o eventos climáticos puntuales (vientos, lluvia, sequías cortas), que pueden afectar particularmente a nuestras escasas muestras de TS. El objetivo de este estudio es analizar la dinámica de los patrones espaciales de temperatura de superficie como consecuencia de los procesos de crecimiento urbano, utilizando series temporales de imágenes satelitales de alta resolución temporal como una forma de integrar las mediciones de TS anuales y disminuir los efectos de eventos extremos puntuales en el tiempo.

Los análisis del impacto de la expansión urbana sobre la temperatura de superficie pueden ayudar a comprender los efectos de los actuales y futuros modelos de crecimiento urbano, no sólo sobre los habitantes de las ciudades sino también sobre la dinámica de la vegetación y la biodiversidad animal asociada. Las relaciones entre urbanización y dinámica de las comunidades vegetales están asociadas a procesos de retroalimentación con características complejas y muchas veces no lineales. En general, se propone que el sobrecalentamiento de las áreas urbanas alteran la fenología (ciclos de crecimiento) de las plantas asociadas, alargando su estación de crecimiento y volviéndolas, posiblemente, más productivas en comparación con los ambientes naturales circundantes. En este sentido, los cambios climáticos generados por los procesos de urbanización (principalmente el aumento de temperatura) son considerados análogos a los cambios sufridos por el clima a escala global

(Neil y Wu 2006, Ziska *et al.* 2003). Es por esto que se pueden utilizar los ecosistemas urbanos como experimentos a pequeña escala o modelos del cambio climático global.

## Métodos

El presente trabajo se llevó a cabo tomando como modelo el área metropolitana del Gran San Miguel de Tucumán (GSMT), en el Noroeste de Argentina (25° 50' S, 65° 13' O). La dinámica de crecimiento urbano del GSMT es representativa de las principales ciudades de Argentina, y puede ser extrapolado a otros núcleos urbanos de tamaño intermedio que estén experimentando simultáneamente una densificación de edificaciones en el área central y una expansión urbana de baja densidad en la periferia. 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 (INDEC 2010). 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. Para evaluar el efecto de los procesos de crecimiento urbano sobre los patrones espaciales de Temperatura de Superficie en el GSMT se analizó el período 2000-2010. El período analizado combina altas tasas de crecimiento urbano en Argentina (INDEC2010) con la disponibilidad de imágenes satelitales de distintas características involucradas en el análisis (MODIS, Landsat 5 TM).

Para determinar los patrones espaciales de expansión urbana se utilizaron dos escenas Landsat 5 TM (17/09/2000 y 16/09/2010). Las imágenes fueron corregidas para lograr coherencia espacial y corregidas radiométricamente para mitigar los efectos atmosféricos sobre los datos de las imágenes (Paolini *et al.* 2006). La reconstrucción de los patrones de expansión urbana espacialmente explícitos se realizó mediante la detección de cambios en las superficies impermeables entre el año 2000 y el año 2010. La clasificación de las imágenes se llevó a cabo utilizando el clasificador Support Vector Machine a partir de muestras de en-

trenamiento extraídas de las imágenes y chequeadas en campo. Como resultado de las clasificaciones se obtuvieron dos mapas temáticos (2000 y 2010) de superficies impermeables y no impermeables. A partir de la diferencia entre estos mapas temáticos se construyó un mapa espacialmente explícito de nuevas superficies impermeables. Se construyó una matriz de error del cambio a partir del mapa de nuevas superficies impermeables, mediante el relevamiento a campo de estructuras urbanas de diversa envergadura (urbanizaciones, supermercados, centros comerciales, barrios cerrados, etc.) con fecha de realización conocida, comprendida dentro del periodo analizado. Los resultados de la matriz de error muestran una precisión general superior al 90%, con valor de kappa de 0.88.

Para la reconstrucción de los patrones espaciales de TS utilicé una metodología basada en el análisis de series temporales de imágenes satelitales MODIS. Trabajé con la serie completa de compuestos cada 8 días de temperatura de superficie (MOD11A2) para los años 2000 y 2010. Esto implicó el procesamiento de 184 escenas (46 escenas por cada año analizado, diurnas y nocturnas). De esta manera obtuve una medida integral de la dinámica intra-anual de TS espacialmente explícita para la totalidad del área de estudio. Para analizar la dinámica de la TS se utilizó el promedio anual de la temperatura diurna y nocturna como una medida integradora de la dinámica anual.

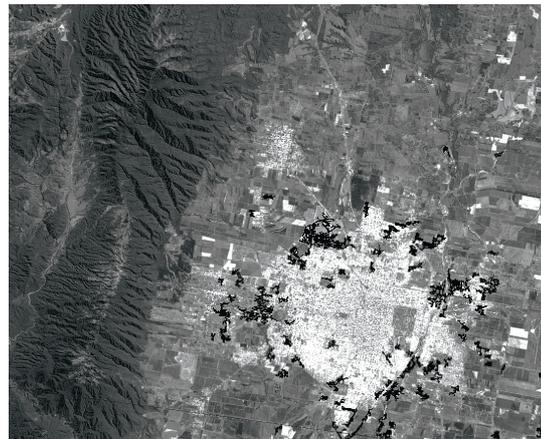
Para evaluar la respuesta de la TS ante los procesos de cambio de uso del suelo en el área urbana del GSMT, se evaluaron tres situaciones diferentes: 1) Área de expansión urbana (nuevas áreas impermeables, típicamente periféricas), 2) Área de densificación urbana (áreas del centro de la ciudad ya impermeabilizadas que incrementaron su densidad de edificaciones, típicamente en altura) y 3) Área Control (áreas rurales aledañas al núcleo urbano, con características geográficas similares, que no sufrieron cambios de cobertura y uso del suelo durante el periodo analizado). La relación entre las diferentes formas de crecimiento urbano (por cambio de uso del suelo y por densificación) fue evaluada mediante una prueba t de student pareada entre los valores de TS de 2000 y 2010, tanto para los registros

diurnos como nocturnos. Además, se realizaron diagramas de dispersión de puntos a partir de las diferencias entre la TS del año 2000 y la TS del año 2010, para las tres áreas analizadas (expansión, centro y control), para evaluar los desvíos en relación a la hipótesis de no cambio de la TS durante el periodo analizado.

## Resultados

El crecimiento urbano en el GSMT durante la última década produjo un aumento de la superficie impermeable de aproximadamente el 20% (83.9 km<sup>2</sup> en 2000; 100.6 km<sup>2</sup> en 2010). Las nuevas superficies están localizadas mayormente en la periferia de la ciudad y están asociadas al proceso de expansión urbana. (Figura 1). El crecimiento del área central de la ciudad se debe principalmente al aumento poblacional entre 2000 y 2010 (25.000 habitantes aproximadamente; INDEC 2010) y al marcado aumento en las edificaciones.

Los resultados muestran cambios significativos en los valores de TS en respuesta a los diferentes procesos de crecimiento urbano entre el año 2000 y el año 2010. Los valores absolutos de la TS promedio diurna sufrió un incremento mayor a 1 °K en las áreas de expansión urbana (nuevas superficies impermeables), mayor a 0.5 °K en el centro de la ciudad (donde se produjo un aumento en la densidad de edificaciones) y un incremento aproximado de 0.1 °K



**Figura 1.** Expansión urbana en el área de estudio (GSMT) para el periodo 2000-2010. En negro, nuevas superficies impermeables agregadas durante el periodo de analisis.

**Tabla 1.** Variación de la temperatura de superficie (TS) entre 2000 y 2010, para los tres sitios de estudio. A) Temperatura de superficie diurna; B) Temperatura de superficie nocturna

Fecha /sitio	Expansión	Centro	Control
<b>A. Δ de TS diurna (°K)</b>			
2010-2000	+1.2 (*)	+0.65 (*)	+0.14
<b>B. Δ de TS nocturna (°K)</b>			
2010-2000	+1.45 (*)	+1.74 (*)	+0.11

(\*) Estadísticamente significativo ( $p < 0.01$ ).

en los sitios control (Tabla 1.A). De forma similar, los valores absolutos de la TS promedio nocturna aumentaron más de 1 °K en las áreas de expansión, más de 1.5 °K en el centro y aproximadamente 0.1 °K en los sitios control (Tabla 1.B).

Las diferencias entre los valores de TS del año 2000 y 2010 fueron evaluadas estadísticamente para analizar su significancia. Los resultados de los análisis estadísticos muestran que para los sitios de expansión urbana y centro las diferencias son significativas ( $p < 0.001$ ), tanto en los registros diurnos como nocturnos, lo que permite asociar estas variaciones a los procesos de crecimiento urbano ocurridos en las áreas analizadas. Si bien las diferencias en los valores de TS registradas están dentro del margen de error de las estimaciones derivadas de sensores remotos (alrededor de 1 °K), los resultados muestran un patrón consistente y estadísticamente significativo de la relación entre crecimiento urbano y aumento de TS. Las diferencias en los sitios control no son estadísticamente significativas, mostrando que no hubo variaciones relevantes entre los valores TS del año 2000 y los del año 2010 (Figura 2).

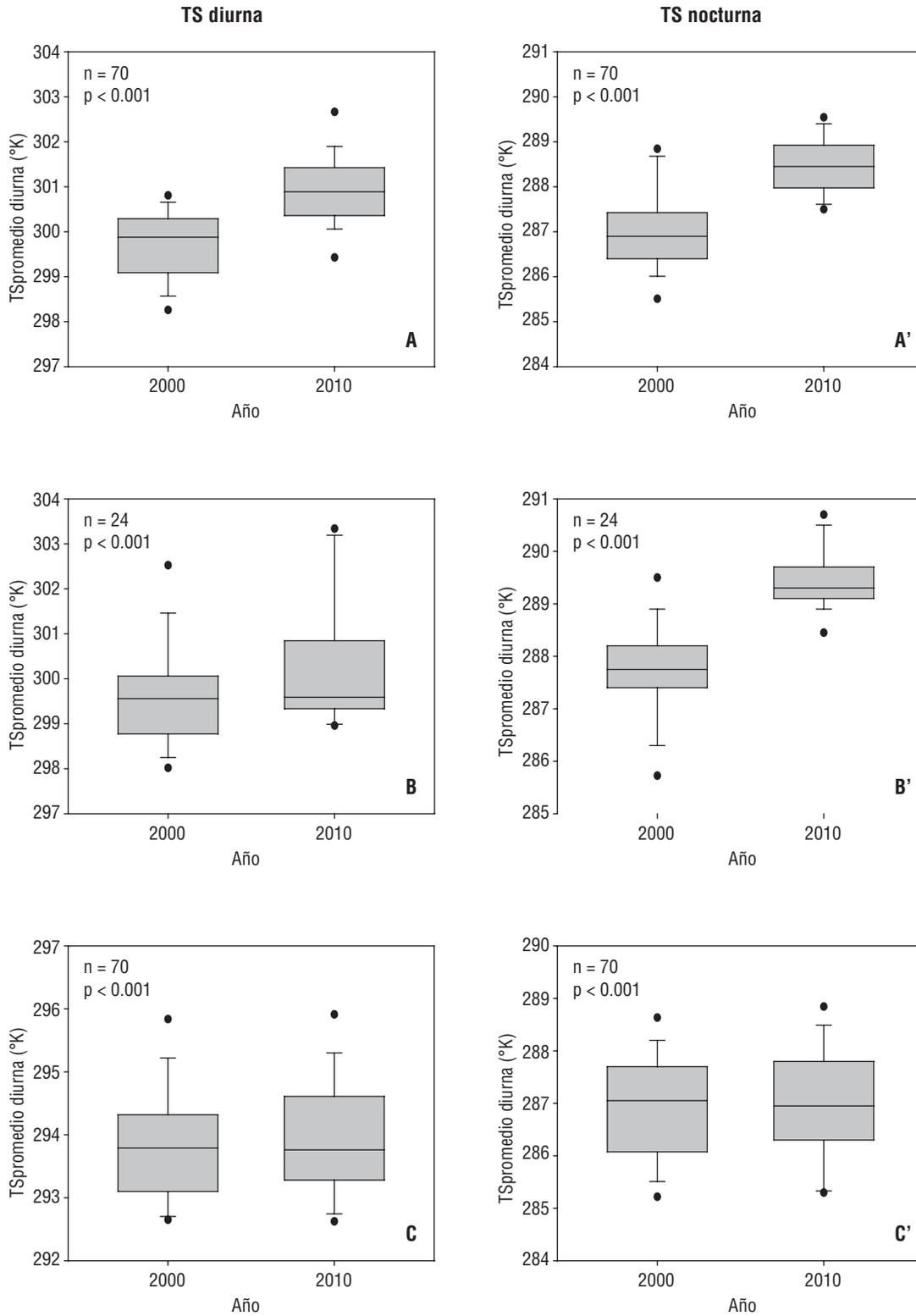
Los gráficos de dispersión muestran como las diferencias en la TS diurna y nocturna se comportan frente a la hipótesis de no cambio en la TS, entre 2000 y 2010. En concordancia con los resultados anteriores, la TS diurna de las áreas de expansión muestran el mayor desvío (positivo) con respecto a tendencia lineal, mientras que la TS del área central muestra un desvío positivo menor y los sitios control no muestran prácticamente ningún desvío. En el caso de la TS nocturna, las áreas de expansión y del centro de la ciudad muestran un marca-

do incremento en prácticamente todo el rango de valores, mientras que los sitios control se mantiene prácticamente sin variaciones.

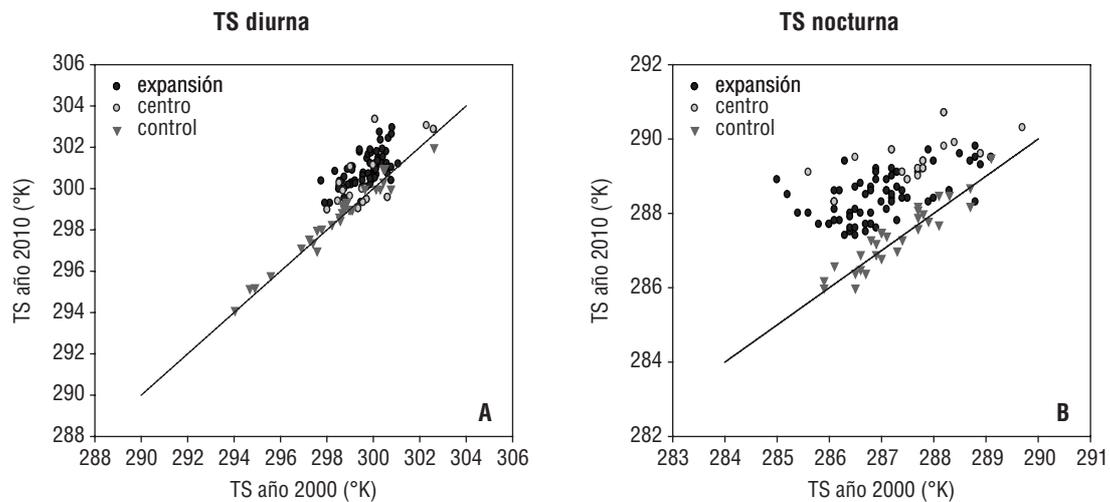
## Conclusiones y discusión

Los procesos de urbanización están fuertemente asociados a cambios de uso del suelo, sobre todo en relación a los nuevos patrones de expansión urbana de baja densidad. Si bien, en general, se propone que el aumento de densidad de ocupación del suelo (i.e. crecimiento en altura) es el factor determinante para la formación de la «isla de calor urbana», las tendencias recientes de expansión urbana acelerada tienen efectos significativos en la modificación de la temperatura local, principalmente debido a la modificación de los flujos de energía como resultado de la impermeabilización de suelo.

Los resultados del presente trabajo muestran que el aumento de la temperatura de superficie está directamente relacionado con el crecimiento urbano, como consecuencia tanto de procesos de densificación urbana como de expansión urbana. La expansión de la ciudad hacia áreas periféricas (expansión) produjo un incremento importante de la TS, tanto diurna como nocturna, mientras que el crecimiento en densidad de construcciones (principalmente en altura) del centro de la ciudad tuvo un impacto más importante sobre la TS nocturna. Los patrones de cambio encontrados refuerzan los supuestos de formación de las «islas de calor urbanas» como consecuencia de una mayor captación de energía durante el día por parte de las edificaciones y su posterior liberación



**Figura 2.** Valores de Temperatura de Superficie (diurna y nocturna) en los tres sitios analizados, para el periodo 2000-2010. **A** y **A'** Expansión; **B** y **B'** Centro; **C** y **C'** Control.



**Figura 3.** Relación entre la temperatura de superficie de los años 2000 y 2010, en los tres sitios analizados. **A)** Temperatura de superficie diurna; **B)** Temperatura de superficie nocturna.

durante la noche. Si bien las ciudades siguen creciendo en densidad de construcciones, la dinámica más reciente de expansión urbana hacia áreas rurales de la periferia plantea nuevas preguntas acerca del efecto del crecimiento urbano sobre los cambios climáticos a escala local. Las áreas de expansión presentan menos inercia térmica posiblemente debido a la menor densidad de cemento y una menor altura de sus edificaciones, lo que hace que las construcciones acumulen menos energía y que la circulación del aire se vea menos obstaculizada por los edificios. Si esta hipótesis fuera correcta uno esperaría encontrar una relación directa entre la temperatura de superficie nocturna y la altura media de las diferentes zonas dentro de una ciudad o entre ciudades con condiciones climáticas similares.

A su vez, el reemplazo de áreas naturales como consecuencia de la expansión urbana puede incrementar considerablemente las superficies impermeables de las ciudades, generando alteraciones no solo en los flujos de energía sino también en la dinámica hídrica (menor evapotranspiración, mayor escorrentía) lo que puede reforzar el calentamiento de las áreas urbanas más allá de sus límites geográficos. En este sentido, los estudios de este tipo son relevantes para poder construir un modelo global de los efectos del crecimiento urbano sobre los patrones climáticos locales. Esto nos permitiría no sólo predecir las alteraciones futuras del

clima, sino también modelar el consumo energético futuro (directamente relacionado con el calentamiento urbano) y las emisiones de CO<sub>2</sub>, manejar exitosamente la vegetación urbana y en definitiva proponer acciones que tiendan a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

## Agradecimientos

Al Dr. Ezequiel Araoz, cuyos aportes contribuyeron a mejorar los análisis de los datos.

Este proyecto fue financiado en parte por CONICET, Argentina.

## Referencias

- ALBERTI, M. 2005. The effects of urban patterns on ecosystem function. *Int. Regional Sci. Rev.* 28, 168-192.
- ANGEL, S., PARENT, J., CIVCO, D. L., BLEI, A. M., & POTERE, D. 2010e. A planet of cities: Urbanland cover estimates and projections for all countries, 2000-2050. Working Paper. *Cambridge MA: Lincoln Institute of Land Policy.*
- ANGEL, S., PARENT, J. CIVCO, D. L. & BLEI, A. M. 2011. Making Room for a Planet of Cities (Policy Focus Report). *Lincoln Institute of Land Policy Inventory ID PF027*; English; ISBN 978-1-55844-212-2. [http://www.lincolninst.edu/pubs/1880\\_Making-Room-for-a-Planet-of-Cities-urban-expansion](http://www.lincolninst.edu/pubs/1880_Making-Room-for-a-Planet-of-Cities-urban-expansion).

- GLAESER, E. L. 2011. Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier. *Macmillan Ed.*
- GRIMM, N. B., FAETH, S. H., GOLUBIEWSKI, N. E., REDMAN, C. L., WU, J., BAI, X., & BRIGGS, J. M., 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science* 319, 756-760.
- INDEC, Censo 2010. <http://www.sig.indec.gov.ar/censo2010/>
- JENERETTE, G. D., HARLAN, S. L., BRAZEL, A., JONES, N., LARSEN, L., & STEFANOV, W. L. 2007. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology* 22: 353-365.
- MCKINNEY, M. L. 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biol. Conserv.* 127, 247-260.
- MILLS, G. 2007. Cities as agents of global change. *International Journal of Climatology* 27: 1849-1857.
- NEIL, K., & WU, J. 2006. Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review. *Urban Ecosystems* 9: 243-257.
- OKE, T. R. 1982. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108:1-24.
- OKE, T. R. 1997. Urban climates and global change, in: Perry, A., Thompson, R. (Eds), *Applied climatology: principles and practices*, Routledge, London, pp. 273-287.
- OLTRA-CARRIO, R., SOBRINO, J. A., GUTIERREZ ANGONESE, J., GIOIA, A., PAOLINI, L. & 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. *Revista de Teledeteccion* 34: 69-76.
- PALOMINO, D., & CARRASCAL, L. M. 2006. Urban influence on birds at a regional scale: A case study with the avifauna of northern Madrid province. *Landscape and Urban Planning* 77: 276-290.
- PAOLINI, L., GRINGS, F., SOBRINO, J. A., JIMENEZ MUÑOZ, J. C., & KARSZENBAUM, H. 2006. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing* 27 (4): 685-704.
- PICKETT, S. T. A., CADENASSO, M. L., GROVE, J. M., NILON, C. H., POUYAT, R. V., ZIPPERER, W. C., & COSTANZA, R. 2001. Urban Ecological Systems: Linking Terrestrial Ecological, Physical, and Socioeconomic Components of Metropolitan Areas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 32, 127-157.
- SALA, O. E. (y 18 más). 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287, 1770-1774.
- SHOCHAT, E., WARREN, P., FAETHS, S., MCLNTYRE, N., & HOPE, D. 2006. From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 21(4): 186-191.
- UNFPA. 2011. Informe sobre el estado de la población mundial 2011: 7 mil millones de personas: su mundo, sus posibilidades. [http://www.un.orghttp://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/SWP\\_2011/SP-SWOP2011.pdf](http://www.un.orghttp://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/SWP_2011/SP-SWOP2011.pdf)
- VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A., LUBCHENKO, J., & MELILLO, J. M. 1997. Human domination on earth's ecosystems. *Science* 277,494-499.
- WENG, Q., LU, D., & SCHUBRING, J. 2003. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89 (4): 467-483.
- ZISKA, L. G., GEBHARD, D. E., FRENZ, D. A., FAULKNER, S., SINGER, B. D., & STRAKA, J. 2003. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. *J. Allergy Clin Immunol* 111:290-295.