



Gradiente urbano-rural del funcionamiento de los ecosistemas de ciudades del Mercosur. Un análisis basado en sensores remotos

Carlos Marcelo Di Bella¹
José María Paruelo² y
Julieta Verónica Straschnoy³

Introducción

La expansión de áreas urbanas provoca una serie de alteraciones en distintos aspectos de los sistemas ecológicos ambientales, sociales, culturales, económicos y políticos. Algunas de ellas incluyen a las transformaciones estructurales debidas al reemplazo y modificación en el uso y ocupación del suelo; la variación en el funcionamiento del medio ambiente urbano/rural, las transformaciones en los aspectos sociales que ellos provocan (Cuccia 1982). Estos cambios generan una serie de nuevos patrones y procesos (Herold *et al.* 2002) tales como: a) la descentralización y centralización de áreas urbanas; b) la formación de cinturones urbanos; c) la colonización de áreas rurales y espacios silvestres; y d) la generación de nuevas áreas urbanas, como por ejemplo los polos tecnológicos o polos industriales.

En relación con los aspectos funcionales de los ecosistemas, los distintos usos del suelo inciden en el balance energético de las áreas circundantes, impactando directamente sobre la capacidad de los sistemas físicos y biológicos para proveer bienes y

¹ Departamento de Investigaciones - Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales - Paraguay 1401 Ciudad Autónoma de Bs. As. - Argentina - cdibella@cnie.inta.gov.ar.

² Instituto de Clima y Agua - INTA Castelar - Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712) - Castelar - Bs. As. Argentina

³ IFEVA - Cátedra de Ecología - Facultad de Agronomía - UBA y CONICET - Av. San Martín 4453 (1417) - Ciudad Autónoma de Bs. As. - Argentina.

servicios indispensables para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad (Dale *et al.* 2000 – a y b; Zipperer *et al.* 1997; Vitosek *et al.* 1997; Verburg *et al.* 1999). Las variaciones en la temperatura en el gradiente urbano/rural (entre 1.1 y 4.4 °C) y el descenso de la tasa de evapotranspiración son los efectos más destacados (Streutker 2002). Este fenómeno de aumento de la temperatura en las áreas urbanas, conocido como “*urban heat island*” (isla urbana de calor¹), provoca un aumento en la demanda de energía para enfriamiento tanto en áreas comerciales como residenciales. Consecuentemente se incrementan las emisiones a la atmósfera de contaminantes tales como dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxido nitroso y partículas en suspensión así como también dióxido de carbono, los cuales contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Finalmente, y durante el verano en mayor medida, los focos calientes aceleran la formación de “*smog*” constituido, entre otros contaminantes, por óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC_s), los cuales combinados fotoquímicamente producen como contaminante secundario ozono al nivel de la superficie. Si integramos estas modificaciones a una escala regional, es posible que se altere el balance energético de los sistemas atmosférico, terrestre e hidrológico. Asimismo, la temperatura puede afectar los ciclos fenológicos alterando los patrones estacionales de crecimiento de la vegetación (White *et al.* 2002) y en cierta medida la asimilación de carbono y por lo tanto el balance de carbono (White *et al.* 1999). Los aspectos sociales, entre los cuales es posible destacar la segregación social, la ruptura del tejido social y la desintegración espacial del mercado laboral, son algunas de las consecuencias que producen los cambios en la conformación estructural del medio ambiente urbano.

En este contexto, se han desarrollado distintas herramientas para comprender y evaluar el funcionamiento de los ecosistemas urbanos y rurales, entre ellas, los modelos de simulación. Los productos generados por dichas herramientas son de invaluable importancia para urbanistas y ecólogos de las más diversas disciplinas. Los objetivos más importantes que persiguen incluyen: a) proveer conocimientos y comprender la dinámica de los sistemas urbanos; b) anticipar y pronosticar cambios futuros en el desarrollo; c) describir y asesorar acerca de futuros desarrollos; y d) explorar distintas políticas y optimizar el planeamiento y manejo urbano. A partir de estos objetivos, innumerables aplicaciones han sido desarrolladas para conocer: I) el impacto de las decisiones locales en un contexto regional de estudio; II) el cambio a largo plazo y la ocurrencia de eventos extremos inesperados de manera de poder planificar su evolución; III) la preservación de paisajes; IV) los efectos antrópicos y el modo de minimizarlos; y V) los efectos del desarrollo sobre los procesos ecológicos con el objeto de poder mitigarlos.

¹ Situación atmosférica que se presenta en las grandes ciudades y consiste en el rápido aumento de la temperatura desde las afueras hacia el centro urbano, donde los edificios y el asfalto desprenden por la noche el calor acumulado durante el día.

Estos modelos necesitan para su funcionamiento de la provisión de un número importante de variables de entrada (“inputs”) tales como información acerca del uso y la ocupación del suelo o el comportamiento térmico y productivo de los ecosistemas, entre otros. En tal sentido, la utilización de sensores remotos, especialmente los montados a bordo de satélites de observación de la tierra, permiten obtener información de la superficie terrestre en tiempo real y a distintas escalas espaciales y temporales. Entre dicha información, la captada en las bandas visibles e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, permite diferenciar de manera indirecta los distintos tipos de cobertura (Guerschman *et al.* 2003), estimar ciertas características funcionales de los ecosistemas como la productividad primaria neta (Paruelo *et al.* 2000) o estudiar los cambios espaciales en un gradiente urbano-rural (Klas y Straschnoy 2002; Oesterheld *et al.* 1998). Asimismo, a partir de la información correspondiente al infrarrojo térmico es posible estudiar los campos de temperatura de superficie (Ts) al mismo tiempo que es posible estimar ciertas características del balance hídrico a escala regional, como por ejemplo la evapotranspiración (Di Bella *et al.* 2000).

En Sudamérica, es factible estudiar el funcionamiento de los ecosistemas en el gradiente urbano/rural debido a la importante concentración urbana de algunas ciudades, circundadas por extensas áreas rurales. Se consideró como hipótesis del presente trabajo que las actividades desarrolladas en las ciudades afectan el funcionamiento (el intercambio de materia y energía) del entorno urbano/rural, modificando significativamente la fenología, la productividad y el balance de agua de dichas áreas. Asimismo, es posible que dichas alteraciones sean variables en función del tipo de vegetación y clima. De esta manera se planteó como objetivo principal caracterizar espacial y temporalmente el comportamiento térmico y la marcha de la vegetación en el gradiente urbano-rural de algunas de las más importantes ciudades del Mercosur. A partir de estos conocimientos se espera estudiar y comprender mejor el funcionamiento de dichos ecosistemas, intentando contribuir en su manejo de manera más racional y sustentable.

Materiales y Métodos

I. Áreas de estudio

Para desarrollar el presente trabajo se seleccionaron ciudades del Mercosur, las cuales no sólo son contrastantes en cuanto a su dimensión y población, sino que además difieren en cuanto al clima y bioma circundante. Las ciudades estudiadas fueron: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Rosario, Porto Alegre, Sao Paulo y Montevideo (Tabla 1). Para todas ellas se consideró el total del área metropolitana. Resulta importante destacar que Buenos Aires y Montevideo concentran el 32% y el 40% de la población total de cada uno de sus respectivos países. Para el caso de Brasil, la ciudad de Sao Paulo centraliza la mayor densidad de población y actividad económica de dicho país.

Tabla 1: Ciudades del Mercosur seleccionadas como áreas de estudio. (1) Censo 2001 – Instituto Nacional de Estadística y Censo (INDEC); (2) Censo 2000 – Instituto Brasileiro de Estadística y Geografía (IBGE) y (3) Población estimada al 30/06/02 – Instituto Nacional de Estadísticas de Uruguay (INE). Todas las ciudades incluyen los cinturones periféricos.

CIUDAD	PROVINCIA/ESTADO/ DEPARTAMENTO	PAIS	LOCALIZACION		HABITANTES
			LAT	LON	
Buenos Aires	Capital Federal	Argentina	-34.58	-58.40	11.453.725 ⁽¹⁾
Rosario	Santa Fe	Argentina	-32.92	-60.70	1.159.004 ⁽¹⁾
Sao Paulo	Sao Paulo	Brasil	-23.50	-46.60	10.434.252 ⁽²⁾
Porto Alegre	Río Grande do Sul	Brasil	-25.45	-49.28	1.360.590 ⁽²⁾
Montevideo	Montevideo	Uruguay	-34.92	-56.17	1.382.149 ⁽³⁾

En la Tabla 2 se detallan para cada una de las ciudades seleccionadas los biomas característicos (Hueck y Seibert 1972) y los valores medios anuales históricos de temperatura (°C) y precipitación (mm).

Tabla 2: Biomas, temperatura y precipitación media anual histórica de cada ciudad estudiada. (1) www.worldclimate.com y (2) Datos correspondientes a Carrasco (Uruguay).

CIUDAD	BIOMAS	TEMPERATURA(°C) ⁽¹⁾	PRECIPITACION (mm) ⁽¹⁾
Buenos Aires	Pastizal	16,6	1005,2
Rosario	Bosque tropical / subtropical húmedo	16,9	980,8
Sao Paulo	Bosque tropical / subtropical húmedo	18,3	1387,2
Porto Alegre	Bosque tropical / subtropical húmedo	19,4	1332,6
Montevideo	Pastizal	16,5 ⁽²⁾	1096,0 ⁽²⁾

II. Información satelital

Para el estudio de los patrones tempo-espaciales de temperatura y la dinámica funcional de dichos ecosistemas se utilizó información satelital, de alta y baja resolución espacial:

II.1 NOAA-AVHRR Pathfinder (PAL) – Baja Resolución Espacial

Se utilizó información mensual correspondiente al satélite meteorológico NOAA-AVHRR de la serie Pathfinder, con una resolución espacial de 8 km x 8 km por píxel para las bandas 1, 2 y 4 (rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético, respectivamente). Apartir de la información correspondiente a las bandas 1 y 2 se generó el Índice de Vegetación de Diferencia Norma-

lizada (NDVI), el cual se encuentra altamente correlacionado a la biomasa verde y la productividad primaria (Goward *et al.* 1985; Tucker *et al.* 1985; Box *et al.* 1989; Running 1988; Burke *et al.* 1991; Prince 1991; Hobbs 1995; Paruelo *et al.* 1997; Paruelo *et al.* 2000). Tanto la información correspondiente al NDVI como la de temperatura de superficie (T_s) calculada a partir de la banda 4, fueron procesadas desde julio de 1981 hasta enero de 2000 (218 imágenes). Sin embargo, debido a problemas en los valores radiométricos, no se consideraron para el presente análisis los datos correspondientes a los meses de Mayo, Junio y Julio de toda la serie (Tabla 3).

Tabla 3: Imágenes mensuales NOAA-AVHRR Pathfinder (PAL) de NDVI y Temperatura de superficie (T_s) utilizadas en el trabajo.

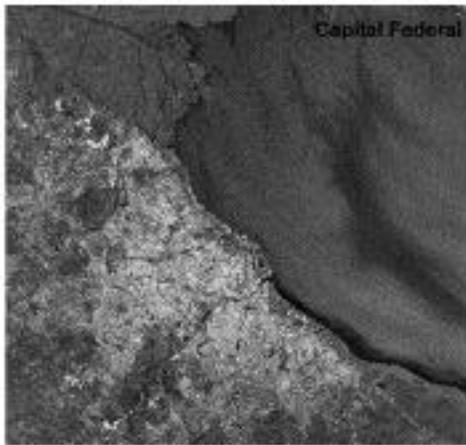
Año	Temperatura (. . °C)												NDVI												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1981																									
1982																									
1983																									
1984																									
1985																									
1986																									
1987																									
1988																									
1989																									
1990																									
1991																									
1992																									
1993																									
1994																									
1995																									
1996																									
1997																									
1998																									
1999																									
2000																									

II.II LANDSAT – Alta Resolución Espacial

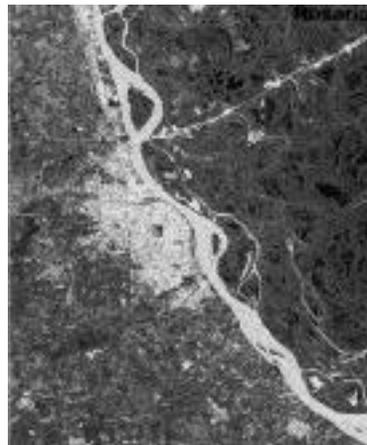
El Instituto de Clima y Agua (INTA-Castelar) dispone de una colección de imágenes correspondientes al satélite Landsat-TM (resolución espacial de 30 m x 30 m). A partir de dicha base de datos se seleccionó una fecha de captura para cada una de las ciudades en las bandas correspondientes al visible, al infrarrojo cercano y al infrarrojo medio (bandas 3, 4 y 5, respectivamente), las cuales fueron utilizadas para cuantificar la superficie y extensión de cada una de las áreas urbanas, peri urbanas y rurales (Figura 1).

Figura 1: Ejemplos de imágenes LANDSAT correspondientes a las ciudades de Buenos Aires, Rosario y Montevideo.

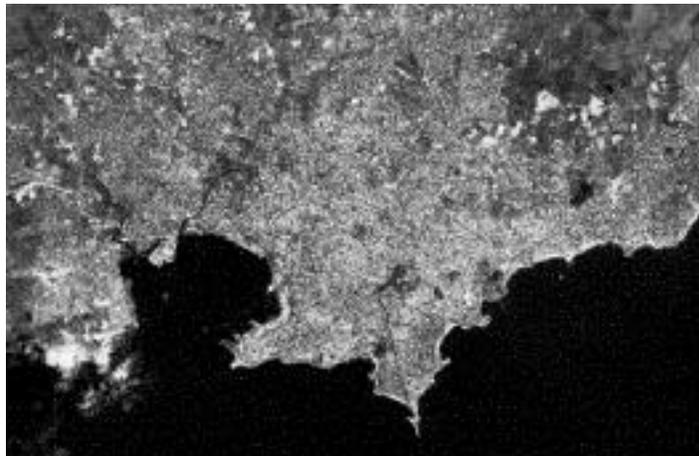
Capital Federal



Rosario



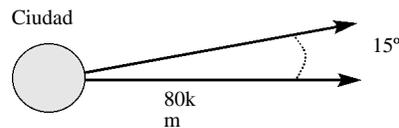
Montevideo



III. Extracción y ordenamiento de los datos

Para extraer información estadísticamente representativa de cada una de las ciudades y su periferia, se diseñaron transecciones equidistantes a 15 grados, con origen en el centro de cada una de las ciudades y una extensión de 80 kilómetros (Figura 2). Se descartaron aquellas transecciones que presentaran importantes cambios en el tipo de cobertura de suelo (cuerpos o cursos de agua, cordones montañosos, etc.).

Figura 2: Transectas de extracción de datos



IV. Análisis de datos

La extracción de dicha información fue realizada a partir de un software estándar de tratamiento digital de imágenes satelitales (©Erdas Imagine). Una vez realizada dicha extracción, se desarrolló un programa que permitió la agregación y ordenamiento de los datos. Toda la información satelital geocodificada fue analizada temporal y espacialmente con el objetivo de identificar el comportamiento térmico y productivo a escala regional. Para ello se utilizaron una serie de software estadísticos y sistemas de información geográfica (SIG).

Resultados y Discusión

Al analizar el comportamiento térmico en función de la distancia (Figura 3, pág. 70) es posible observar que la temperatura de superficie (T_s) disminuye al alejarnos del centro de las ciudades en Buenos Aires, Sao Paulo, Porto Alegre y Montevideo. En estos casos se evidencia el calentamiento de las ciudades por efecto de las coberturas urbanas. En Rosario, por el contrario, no se detectaron variaciones en las temperaturas por efecto de las áreas urbanas. En la misma figura es posible destacar, asimismo, la existencia de zonas con menor temperatura que los extremos entre los 16 y 40 kilómetros del centro de la ciudad. Estas áreas estarían asociadas a cinturones verdes. La irrigación y fertilización, al aumentar la evapotranspiración, disminuirían significativamente la temperatura de superficie.

El NDVI en función de la distancia al centro de la ciudad (Figura 4, pág. 70) presentó un comportamiento similar para todas las ciudades, aumentando a medida que nos alejamos del centro. La amplitud de los valores de NDVI (Diferencia entre el máximo y mínimo estacional) aumentó con el tamaño de la ciudad (Figura 5). Las curvas tienden a alcanzar valores máximos de NDVI alrededor de los 32 km en promedio. El valor máximo alcanzado en las áreas urbanas periféricas a las distintas ciudades fue similar y próximo a 0.51.

Figura 3: Temperatura de superficie (T_s) en función de la distancia al centro de la ciudad.

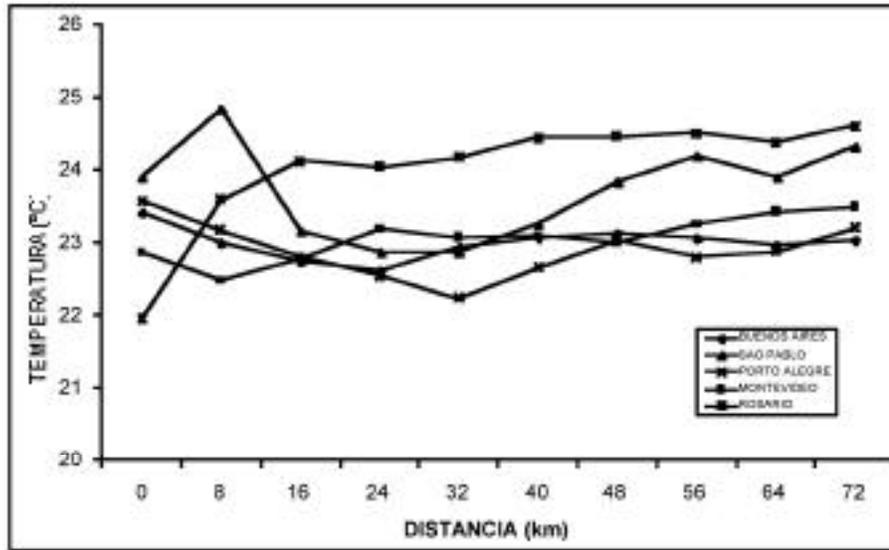


Figura 4: NDVI en función de la distancia al centro de la ciudad.

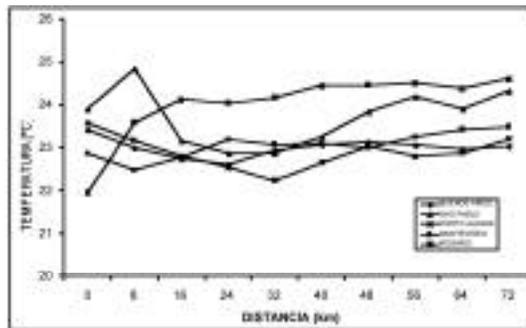
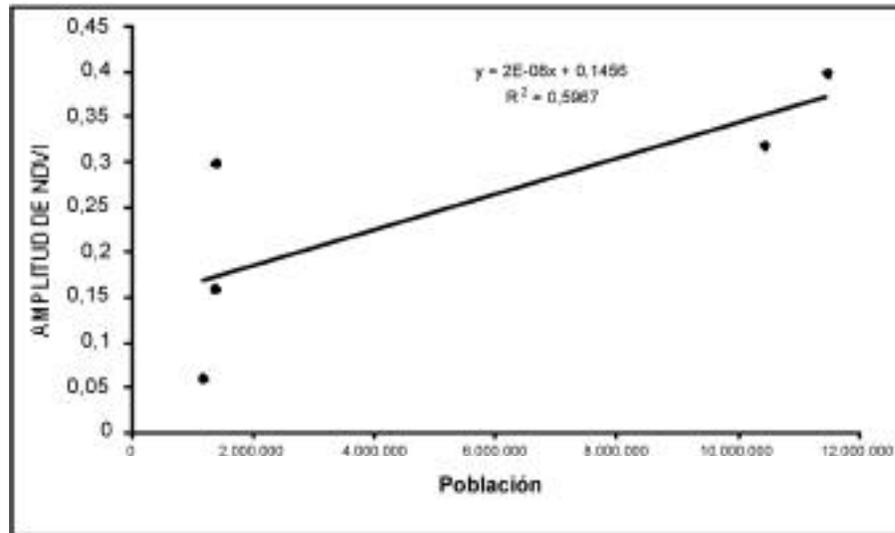


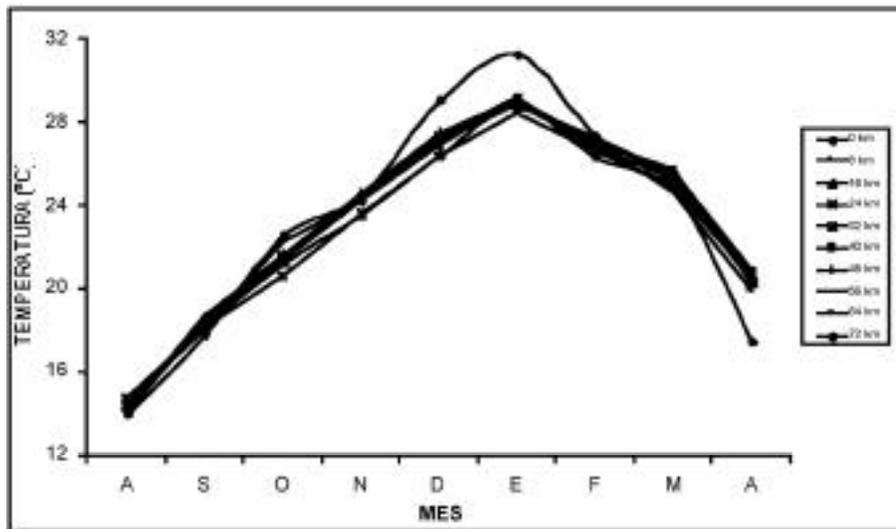
Figura 5: Relación entre la amplitud en la temperatura de superficie y la población.

Al analizar los patrones estacionales de temperatura de superficie (T_s) para cada una de las distancias al centro de la ciudad (Figura 6, pág. 72), se observa en cada caso, que las curvas correspondientes a las distintas distancias presentan una respuesta similar en todas las ciudades. Sin embargo, es posible identificar comportamientos muy característicos y distintivos para las ciudades estudiadas. Mientras Buenos Aires, Montevideo y Rosario (Figuras 6a, 6d y 6e respectivamente) presentan curvas típicas de temperatura acordes con áreas templadas, con un máximo estival y amplitudes térmicas promedio de 15°C para las dos primeras y 12°C para la tercera, Sao Paulo y Porto Alegre (Figuras 6b y 6c) muestran un comportamiento más estable a lo largo del año, con una amplitud térmica promedio de 4°C y 7°C respectivamente. Si analizamos las temperaturas de las áreas centrales y periféricas de cada una de las ciudades, podemos observar que en Buenos Aires y Porto Alegre el centro se encuentra más caliente durante el verano, mientras que en Montevideo dicha diferencia se destaca principalmente en primavera. El centro de Sao Paulo, por el contrario, presenta otra respuesta ya que posee temperaturas más elevadas que la periferia durante todo el año. En el caso de Rosario, el centro de la ciudad no tuvo temperaturas superiores a los suburbios en ningún momento del año.

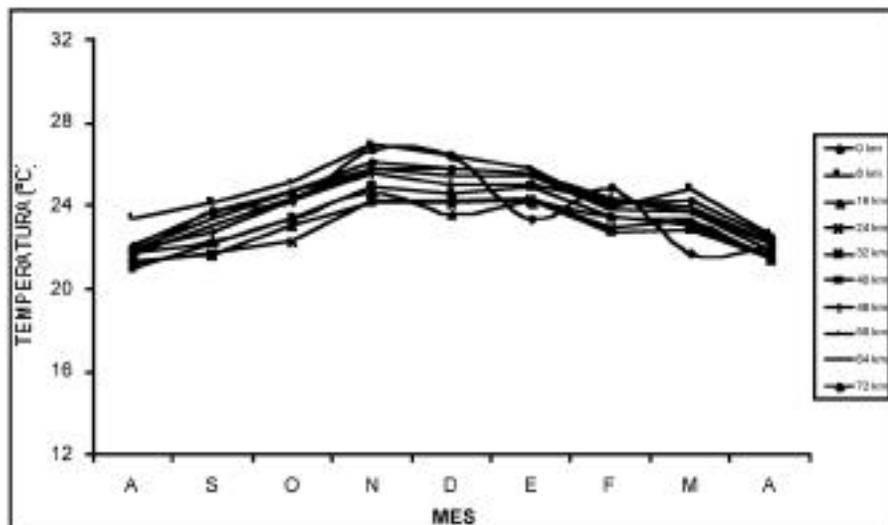
El comportamiento estacional del NDVI (Figura 7, ver págs. 74 y sig.), tanto para Buenos Aires como para Montevideo (Figuras 7a y 7d) presentó un pico primaveral, mientras que para Sao Paulo y Porto Alegre (Figuras 7b y 7c) fue más estable durante todo el año y en el caso de Rosario (Figura 7e), mostró un importante incremento estival. En Buenos Aires, Sao Paulo y Montevideo, encontramos diferencias muy significativas entre los valores de NDVI de los píxeles más próximos al centro

de las ciudades, con un gran incremento en los primeros 16 km. Porto Alegre y Rosario presentaron un aumento del NDVI entre las sucesivas distancias, pero de menor rango.

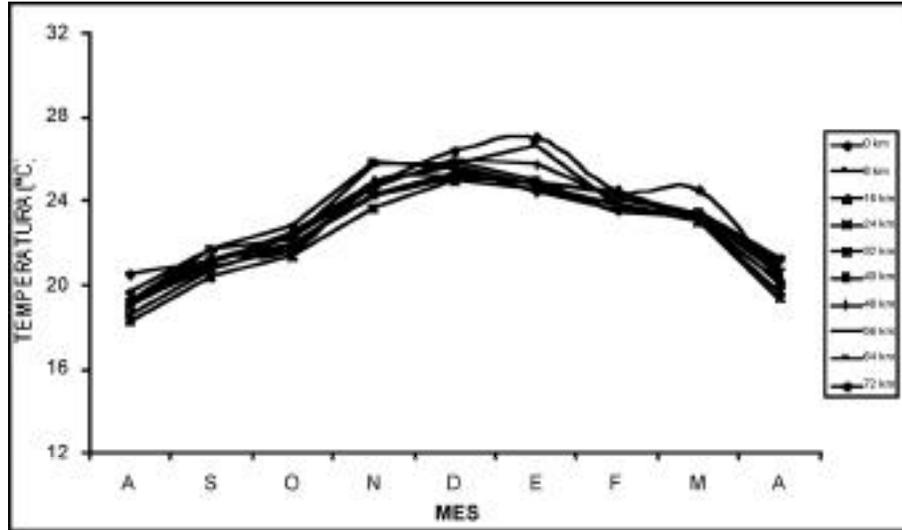
Figura 6: Evolución anual de la temperatura de superficie (Ts)
6a. Buenos Aires



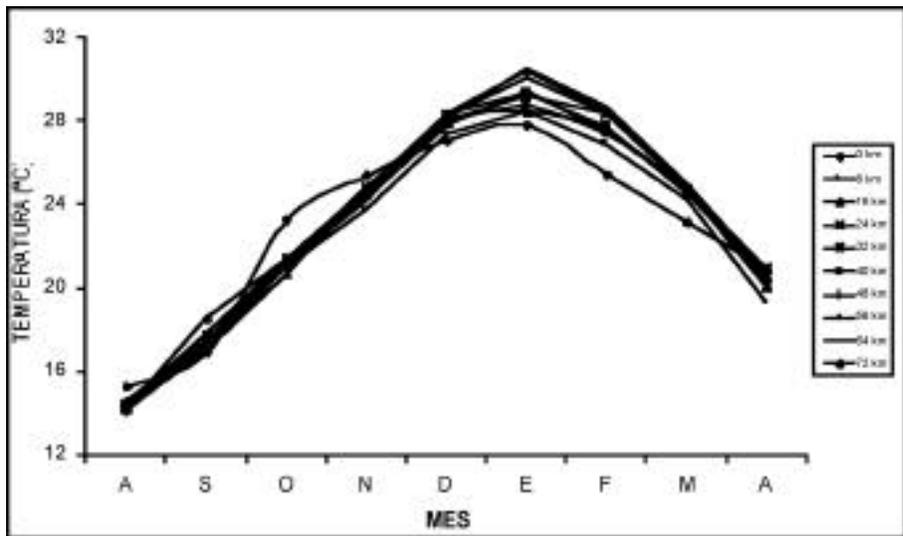
6b. São Paulo



6c. Porto Alegre



6d. Montevideo



6e. Rosario

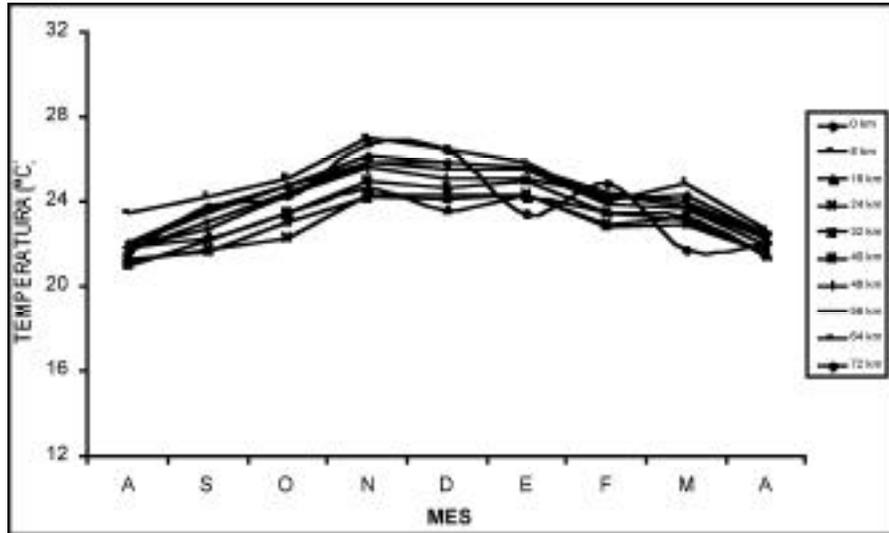
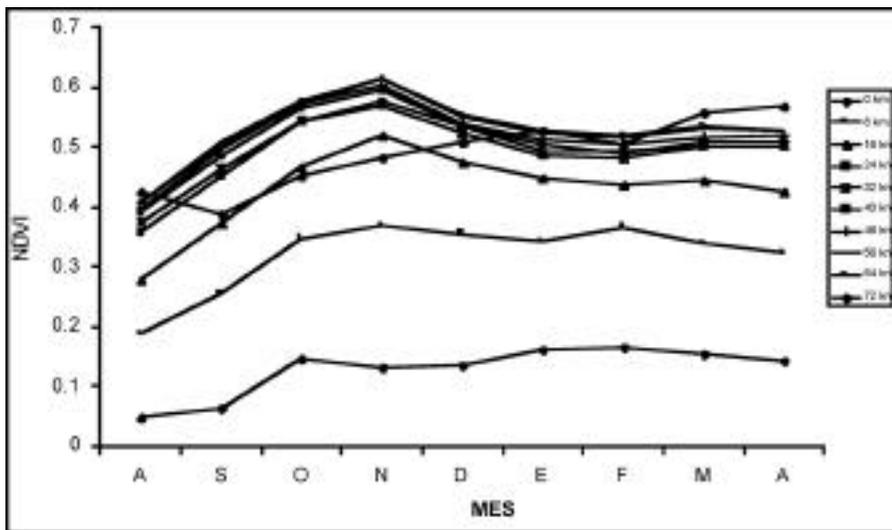
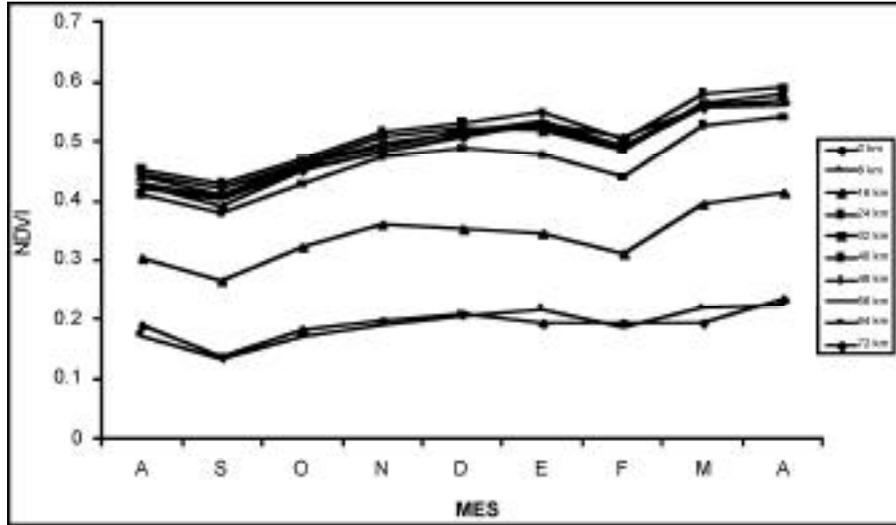


Figura 7: Evolución anual del NDVI

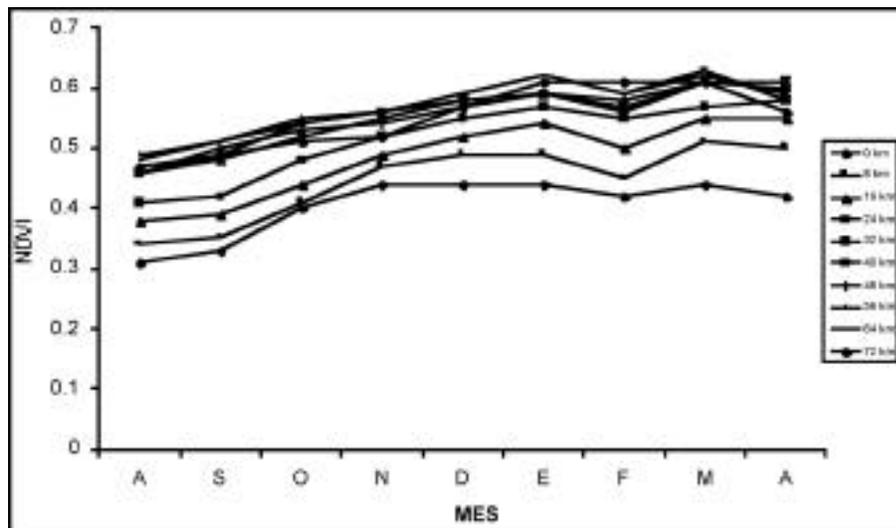
7a. Buenos Aires



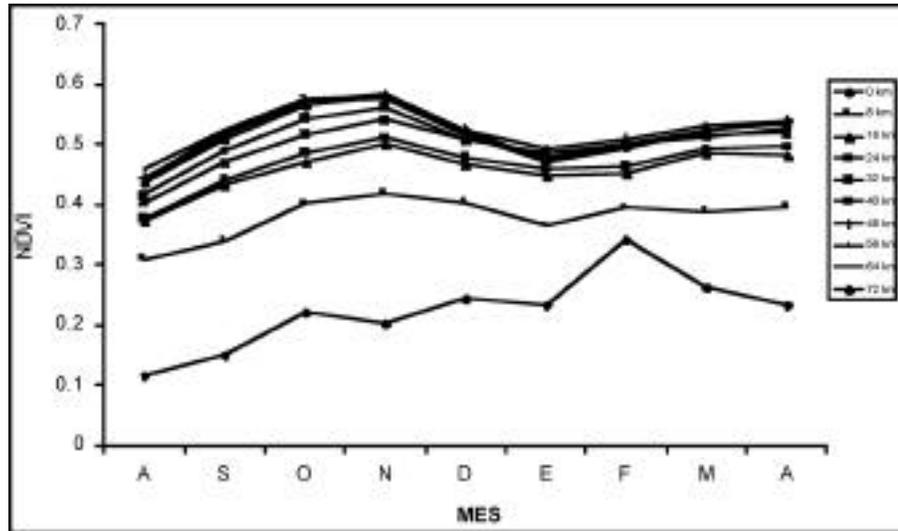
7b. São Paulo



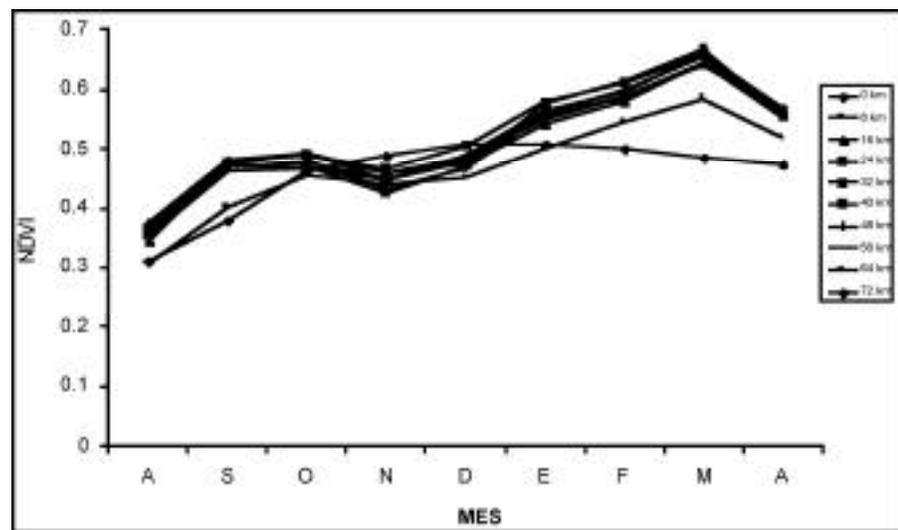
7c. Porto Alegre



7d. Montevideo



7e. Rosario



de las ciudades, con

Conclusiones

En el presente trabajo hemos constatado la utilidad de la información provista por imágenes satelitales en la caracterización de los patrones tempo-espaciales de temperatura y productividad de los ecosistemas sobre un gradiente urbano/rural.

El estudio de la temperatura de superficie (T_s) evidenció en la mayoría de las ciudades estudiadas que el centro de las mismas se encuentra más caliente que la periferia en relación directa con el tamaño del área urbana (cuanto más grande es la ciudad, más amplitud térmica existe con los suburbios). También se pudo observar cómo el clima influye en la respuesta estacional de la temperatura de superficie (T_s), siendo menor la amplitud térmica en las ciudades con clima subtropical que en aquellas con clima templado.

El análisis del NDVI reflejó que la productividad de las áreas estudiadas, si bien es distinta para cada una, en todos los casos aumenta al alejarnos del centro de las ciudades, en relación directa con la dimensión de la misma. Existe entre las ciudades estudiadas un valor umbral muy similar a partir del cual tienden a estabilizarse los valores de NDVI.

El análisis del comportamiento temporal y espacial de la temperatura de superficie (T_s) y del NDVI podría ser una herramienta de estudio interesante para futuros trabajos ya que hemos comprobado que el cambio térmico y productivo no es el mismo, dependiendo del tamaño y del clima de las ciudades. Asimismo, los resultados y patrones encontrados en cada una de las ciudades podría resultar de suma utilidad como "inputs" para modelos de crecimiento y planificación urbana.

Bibliografía

Box, E.O.; Holben, B.N. and Kalb, V. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetation* 80 (1989): 71-89.

Burke, I.C.; Kittel, T.G.F.; Lauenroth, W.K.; Snook, P.; Yonker, M. and Parton, W.J.; Regional analysis of the Central Great Plains. *Bioscience* 41 (1991): 685-692.

Cuccia, Cristina, *Metodología para elaborar diagnósticos sobre el medio ambiente*. Ciudad de Buenos Aires: Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano; 1982, 24 páginas.

Dale, V., "Ecological principles and guidelines for managing the use of land". *Report of the Ecological Society of America Committee on Land Use: Ecological Application*, 10 (2000-a): 639-670

Dale, V.; Haeuber, R., "Forum Perspectives on land use". *Ecological Society of Ame -*

rica. (2000-b): 671-672.

Di Bella, C.M.; Rebella, C.M. and Paruelo, J.M., "Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina". *International Journal of Remote Sensing*, 21(2000): 791-797.

Goward, S.N.; Tucker, S.J. and Dye, D.G., "North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer; *Vegetation*, 64 (1985): 3-14.

Guerschman, J.P.; Paruelo, J.M.; Di Bella, C.M.; Giallorenzi, M.C.; Pacin, F., "Land Cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM Data", *International Journal of Remote Sensing* (Aceptado para su publicación), 2003.

Hobbs, T.J., "The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of Central Australia", *International Journal of Remote Sensing*, 16 (1995): 1289-1302.

Hueck, K. & Seibert, P., *Vegetationskarte von Südamerika*, Stuttgart, Gustav Fisher Verlag, (1972).

INDEC 2002: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2001.

Klas, S.X. y Straschnoy, J.V., Implicancias ambientales del desarrollo urbano. Estudio de caso: Partido de Pilar y Exaltación de la Cruz – Provincia de Buenos Aires. TESIS de la Licenciatura en Gerenciamiento Ambiental, Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, (2002).

Oesterheld, M.; Paruelo, J.M. y Di Bella, C.M., Cambios espaciales y temporales de la vegetación a lo largo del gradiente urbano-rural de la ciudad de Buenos Aires. (1998), Jornadas Argentinas de Teleobservación '98 (17-19 junio 1998 – CONAE – Buenos Aires – Argentina).

Paruelo, J.M.; Epstein H.E.; Lauenroth, W.K. & Burke, I.C., "ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the U.S." *Ecology* 78, (1997): 953-958.

Paruelo, J.M.; Oesterheld, M.; Di Bella, C.M.; Arzadum, M.; Lafontaine, J.; Cahuepé, M and Rebella, C.M., "Estimation of primary production of sub-humid rangelands from remote sensing data", *Applied Vegetation Science* 3, (2000): 189-195.

Prince, S.D., "Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988", *International Journal of Remote Sensing* 12 (1991):1301-1311.

Running, S.W. and Nemani, R.R., "Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different cli-

mates”, *Remote Sensing of Environment* 24, (1988): 347-367.

Streutker, D.R., “Remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas”, *International Journal of Remote Sensing*, 23 (2002): 2595-2608.

Tucker, C.J.; Vanpraet, C.L.; Sharman, M.J. y Van Ittersum, G., “Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel”, *Remote Sensing of Environment*, 17 (1985): 233-249.

Verbug, P.H.; Koning, G.H.J.de; Kok, K.; Veldkamp, A.; Bouma, J., “Aspatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use”, *Ecological Modelling*, 116 (1999): 45-61.

Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; Lubchenko, J.; Melillo, J.M.. “Human domination of Earth’s ecosystems”. *Science*, 277 (1997): 494-499.

White; M.A. Running, S.W. and Thornton, P.E., “The impact of growing season length variability on carbon assimilation and ETover 88 years in the Eastern United States deciduous Forests”, *International Journal of Biometeorology*, 42 (1999): 139-145.

White; M.A.; Nemani, R.R.; Thornton, P.E. and Running, S.W., “Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the Eastern United States deciduous broadleaf forest”, *Ecosystems*, 5 (2002): 260-277.

Zipperer, WC; Foresman, TW; Sisinni, SM and Pouyat, RV, “Urban tree cover: an ecological perspective”, *Urban Ecosystems*, 1 (1997) : 229-246.