

## ESTUDIO SATELITAL DE ISLA DE CALOR/FRÍO EN ROSARIO SEGÚN TEMPERATURAS SUPERFICIALES URBANAS E INDICADORES TEMÁTICOS DE SUELO.

Gabriel Chiarito<sup>1</sup> y Eugenia Chiarito<sup>2</sup>

1. Facultad Arquitectura, Planeamiento y Diseño – Universidad Nacional de Rosario.
2. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario.  
Boulevard N. Oroño 1572 – (2000) Rosario – Argentina  
Tel. (0341) 421-5590 – [arqchiarito@gmail.com](mailto:arqchiarito@gmail.com)

*Recibido: 11-03-19; Aceptado: 03-06-19.*

**RESUMEN.-** Mediante el procesamiento de datos provistos por las imágenes liberadas del satélite LANDSAT TM5 se correlacionan las temperaturas superficiales y el uso del suelo urbano para la ciudad de Rosario. En el trabajo se analizan por zonas urbanas de densidad y tipología de construcción diferenciada los registros térmicos y se comparan con indicadores temáticos de reflectancia de acuerdo a la firma espectral por material que provee en diferentes bandas los sensores de la plataforma satelital.

**Palabras claves:** satélite, temperatura superficial, isla de calor, Rosario.

## SATELLITE STUDY OF HOT/COLD ISLAND IN ROSARIO ACCORDING TO URBAN SURFACE TEMPERATURES AND SOIL THEMATIC INDICATORS.

**ABSTRACT.-** Through the processing of data provided by the images released from the LANDSAT TM5 satellite, surface temperatures and the use of urban land are correlated for the city of Rosario. In the work analyzed by urban areas of density and typology of differentiated construction the thermal records and are compared with thematic indicators of reflectance according to the spectral signature by material that provides in different bands the sensors of the satellite platform.

**Keywords:** satellite, surface temperature, heat island, Rosario.

### 1. INTRODUCCIÓN.

*Urbanización y energía.*

*“Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, y dos tercios de la energía producida se consumen en ellas”.* (Garibotti, 2011).

Las ciudades constituyen parte ineludible de la forma de habitar actual, en 1950 un tercio de la población mundial vivía en ciudades y se estima que pasará a los dos tercios para el año 2030.

Las ciudades son el resultado material de un prolongado proceso histórico de transferencia del entorno inmediato próximo y lejano. Para el caso de las ciudades latinoamericanas o del sur europeo esta transferencia involucra una alta densidad media, debido a las tecnologías constructivas masivas usadas: mampuestos y hormigones, con densidades aparentes superiores 1500Kg/m<sup>3</sup>. La manera de construir aún hoy en buena medida desarrolla las mismas técnicas y materiales que antaño. Los muros de mampuestos

en esencia son los mismos que en la antigua Babilonia y la masividad se expresa por la elección de materiales de densidad relativa media empleados en la construcción urbana.

Nuestras ciudades son tecnológicamente masivas y por tanto el modo de acondicionar el espacio del habitat se basa en la condición inercial de los materiales sólidos, densos y relativamente homogéneos usados, especialmente mampuestos y hormigones convencionales. El comportamiento térmico de las masas urbanas, se puede enunciar simplificado como amortiguadores y retardadores de las condiciones variables de temperaturas ambiente en ciclos diarios. Este proceso de transferencia térmica edilicia se basa en las propiedades superficiales, fundamentalmente de absorptividad en el visible y emisividad en el infrarrojo, tanto como de la capacidad de difusión en masa de los materiales considerados. A estas propiedades de los materiales constitutivos de la ciudad masiva se suman la forma y densidad de ocupación del suelo, que en buena medida condiciona el accionar del viento y la capacidad de carga-descarga energética, la disposición de espacios verdes,

las generaciones internas, la producción de gases contaminantes, y otros, componiendo una integralidad de factores potenciadores dentro de las manchas urbanas extendidas para la aparición de "islas de calor (ICUs)".

La aparición de ICUs en el caso de ciudades densas y masivas, por la efecto de la inercia térmica, presentan retardo en relación a la evolución cíclica de la temperatura ambiente. En el presente trabajo se analiza el fenómeno ICU en Rosario y se describe la dependencia con la configuración de uso del suelo para su determinación considerando que el momento de lectura satelital es determinante en este efecto y por esto se insiste en el particular.

*Tema y alcances.*

En la historia del estudio de la climatología urbana, puede adjudicarse la primera referencia al término "isla de calor urbana" al climatólogo inglés Gordon Manley en 1958, pero en referencia reducida, ya que originalmente estaba restringida a describir las temperaturas nocturnas urbanas en comparación con el entorno. Luego, el concepto de ICU, más representativo y ajustado al empleo actual, en la descripción del fenómeno térmico de las áreas construidas urbanas en comparación con las superficies rurales periféricas puede adjudicarse a los desarrollos de T.R. Oke, descriptas en Boundary Layer Climate (Oke, 1978) como se observa en la figura 1.

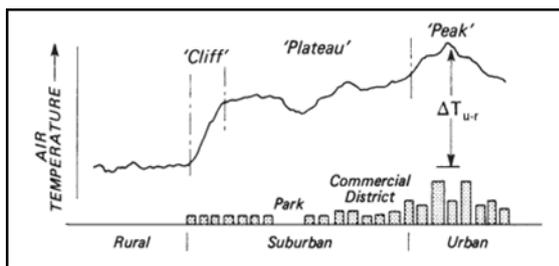


Fig. ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.: Esquema de Isla de Calor Urbana.

Las ICUs pueden clasificarse, según los factores que determinan su configuración y la posibilidad relativa de operar sobre ellos, en: *controlables o incontrolables* (Rizwan & Dennis, 2008); los *controlables* se dividen en dos líneas, una determinada por la población (calor antropogénico, contaminación de aire, etc.) y otra por las tecno-estructuras (materiales de construcción, áreas verdes, disposición espacial); mientras que las denominadas *incontrolables* se presentan en relación a las condiciones propias del clima. En este marco no todos los aspectos tienen la misma significación o peso relativo en la promoción de ICUs. Los factores de mayor gravitación, independientes de las condiciones del clima local, en la constitución ICUs están determinados por las estructuras urbanas, y en particular por: la inercia térmica, el factor de visión de cielo y el albedo (Gridharan, Ganesa, & Lau, 2004). En esta línea de trabajo, Oke propone como factor de diseño urbano causal de registros diferenciados: la relación proporcional alto fachada y ancho calle, directamente relacionado con el factor de visión de cielo a nivel de suelo (Oke, 1978), y debe contemplarse adicionalmente al análisis urbano vial la estructura de vegetación en tanto generadora de "cañones urbanos" con efecto diurno benéfico por sombras con el nocturno en la dificultad del mecanismo de refrescamiento radiante por disminución del factor de cielo visible y deterioro del

potencial convectivo por cobertura verde urbana (Correa, Martínez, & Cantón, 2008).

Otro de los impactos determinantes en las ICUs refiere a las tecno-estructuras del espacio urbano construido y su comportamiento térmico en el ciclo diario. Las variables determinantes del impacto derivan de la propia morfología y de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales empleados en su construcción. Las configuraciones espaciales generan condiciones térmicas particulares de micro-escala en las posibilidades de movimiento de aire y de la radiación solar incidente según la disposición relativa, mientras que las tecnologías y materiales empleados determinan la forma del comportamiento térmico, tanto por efecto de la inercia involucrada en los edificios como por la respuesta absorción-reflexión de la radiación en función de las características superficiales propias de cada material (Correa, Flores Larsen, & Lesino, 2003).

**2. METODOLOGÍA Y PARÁMETROS DE ANÁLISIS**

La base de datos que se dispone para realizar este análisis comparativo proviene de la información producida por las imágenes liberadas del período 2007-2011 del satélite LANDSAT TM5, correspondiente al paso por el área de estudio en la ciudad de Rosario. El tratamiento de imágenes a formato matricial sometido a análisis estadístico permite interpretaciones de las relaciones entre registros térmicos y los espaciales para verificar inicialmente la existencia y magnitud del ICU en la ciudad de Rosario y en segunda instancia la dependencia entre temperaturas y las formas de ocupación del suelo urbano.

Las imágenes tratadas en registros matriciales sectorizados en zonas urbanas desde el centro a periferia permiten relacionar los registros al momento del paso del satélite Landsat TM5. Estos datos indican la existencia del fenómeno opuesto al de ICU, que la bibliografía denomina: "isla de frío urbano" o "isla de frescor urbano (IFU)", caracterizada por temperaturas mayores en la periferia que en el centro. La bibliografía al respecto indica básicamente dos razones en la aparición de IFUs, una hipótesis explica el ordenamiento decreciente de temperaturas con registros menores en el área central al factor denominado: heterogeneidad urbana, por reducción de penetración solar y sombreado (Fernandez Córdoba & García Millan, 2013). La segunda hipótesis, deviene del fenómeno inercial de la masa constructiva en áreas densas urbanas (centro) y ocurre cuando el registro térmico coincide con el pico de enfriamiento por descarga de la masa urbana que por el retardo inercial aparece durante las primeras horas matinales. Los materiales masivos, del tipo de los usados en la construcción tradicional, tienen la propiedad de poder absorber, acumular y ceder calor en procesos extendidos temporalmente, dependiendo de la densidad, el calor específico y la conductividad de estos y de las condiciones del ambiente próximo que permitan la carga y la potencial descarga.

La difusividad térmica de los materiales de construcción convencionales facilita este proceso de acumulación (depende de la densidad, conductividad y calor específico de los mismos), que permite una mayor penetración de la energía en masa y con una menor temperatura superficial potenciar una mayor cantidad de calor acumulado, al tiempo que

ofrecen una menor velocidad de enfriamiento cuando el ciclo se invierte en el proceso de descarga.

La otra variable digna de análisis particular de acuerdo a los datos obtenidos es la influencia de la vegetación urbana. La bibliografía indica que la vegetación provoca un refrescamiento natural del espacio urbano de micro-escala, por modificación de albedo y por el proceso evaporativo metabólico, ya que un árbol promedio evapora del orden de 1500 Kg de agua en un día típico de verano (Moffat & Schiler, 1981), es decir invierte unos 3500 MJ/día en el proceso.

En definitiva, el fenómeno térmico ICU presente en muchas ciudades de variada intensidad involucra un buen número de variables. Por tanto, para ajustar la detección del fenómeno es necesario el análisis en cada contexto urbano particular y a su vez realizar el estudio por sectores, ya que las temperaturas responden a áreas de influencia acotada. (Escolano, 2011).

### 2.1. Isla de calor urbano: materiales y configuración de ocupación del suelo.

En este trabajo se presentan los registros obtenidos al momento de paso satelital HOA 10:46 y verifica que los datos térmicos en las áreas de mayor densidad edilicia son menores que los de zonas menos densas.

El espacio urbano central en Rosario puede caracterizarse como de alta densidad aparente y la tecnología constructiva corresponde a materiales masivos y por tanto con alta inercia térmica. El registro térmico satelital corresponde al inicio del período cíclico diario de carga térmica, correspondiente a los primeros instantes de insolación y las superficies urbanas están en el momento de descarga propio del retardo con el que acompañan la evolución de temperatura ambiente.

La descripción espacial urbana mediante patrones de apropiación de suelo indica el reconocimiento de un número considerable de materiales y configuraciones con posibles agrupaciones que faciliten el análisis reduccionista. En general, los materiales dispuestos en sistemas constructivos son susceptibles de ser clasificados en livianos y pesados. Es decir, aquellos sistemas del tipo al "balloon-frame" o "steel-frame" y por otro lado los "tradicionales masivos" (con densidades aparentes del orden 2000Kg/m<sup>3</sup>) caracterizados por mampuestos y hormigones convencionales. En Rosario, este segundo grupo: el tradicional, es el de difusión generalizada y el comportamiento térmico por su condición masiva es necesariamente inercial y presentan registros de temperaturas amortiguados y retardados temporalmente. En estos materiales hay que contemplar por su capacidad difusiva la acumulación de calor en masa y temperaturas superficiales relativamente bajas.

La plataforma Landsat TM5, mediante la combinación de lecturas de los diferentes sensores montados, permite correlacionar la radiancia espectral y de acuerdo a la forma de respuesta por banda permite identificar el tipo de material emisor. Este proceso determina con aceptable certeza el uso diferenciado de suelo y permite interpretar mediante indicadores temáticos facilitando el análisis, con las limitaciones reduccionistas del método para describir un fenómeno complejo y variado: la ciudad.

### 2.2. Isla de calor urbano: resolución satelital.

La resolución espacial que proveen las imágenes Landsat TM5, permite realizar interpretaciones de escala por sectores relativamente pequeños a escala urbana, teniendo en

consideración que el pixel de información es de 30mx30m y de 120mx120m en el térmico. La lectura de las imágenes procesadas y promediada permite el análisis de situaciones urbanas de manzanero urbano o grandes conjuntos edilicios con buen ajuste y posibilita establecer comparaciones entre zonas.

Esta observación periódica del territorio ofrece información de la energía re-emitida desde la superficie mediante sensores electromagnéticos multispectrales montados en la plataforma que orbita en siete bandas: tres visibles, una infrarroja cercana y dos medianas.

### 2.3 Procesamiento de Imágenes: Temperatura superficial e Indicadores temáticos.

Existen varios métodos para obtener temperaturas superficiales terrestres: TST (Land Superficial Temperature, LST) desde plataformas satelitales con una o más bandas espectrales (Sobrino, Jimenez Muñoz, & Paolini, 2004) . En este trabajo para obtener TST se usa la salida ofrecida por la banda térmica del satélite LANDSAT TM5.

Por su parte, el modelo interpretativo por índices o indicadores temáticos se basa en el análisis del territorio urbano, en su dimensión física, como representación del soporte del complejo que sostiene, donde la interpretación modelizada de las formas de ocupación, permite identificar los tipos de uso del suelo y correlacionarlos con las temperaturas superficiales (TST).

Las imágenes satelitales permiten mediante algoritmos simples elaborar indicadores que interpreten, reproduzcan y expliquen las formas más significativas del uso de suelo de acuerdo a las emisiones por bandas que produce cada superficie.

Dentro de los indicadores temáticos sobresalen: vegetación, agua, suelo desnudo y construcción o edificación, como variables destinadas a explicar las componentes elementales del sistema urbano-rural. Si bien el fenómeno urbano es un ecosistema complejo compuesto por heterogéneos materiales, tiene algunas componentes generalizadoras y para el análisis de TST es posible agrupar el uso del suelo en tres categorías generales: la superficie construida, la vegetación y el agua. Esto se observa en la figura 2.

La dimensión "agua" no representa una variable significativa en el análisis por zonas intra-urbanas debido a la inexistencia en la trama urbana de Rosario, pero en el cuerpo general del trabajo se mantuvo su consideración para analizar el efecto sobre el borde ribereño.

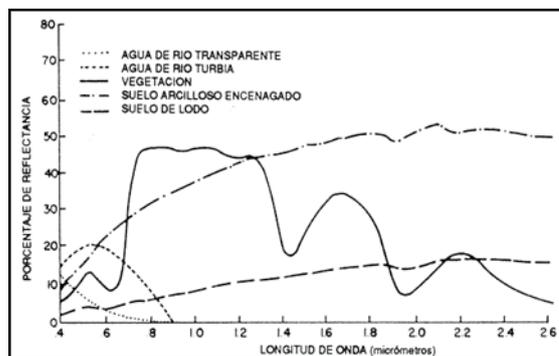


Fig. 2: Firma espectral de distintos elementos superficiales, (Aggarwal, 2003).

Los indicadores temáticos elegidos en el presente trabajo entre los propuestos por la bibliografía son: SAVI: (*Soil Adjusted Vegetation Index*), Indicador de vegetación, MNDWI: (*Modified Normal Difference Water Index*),

Indicador de agua y NDBI: (*Normal Difference Building Index*), Indicador de construcción.

- **SAVI** Soil Adjusted Vegetation Index, (Huete, 1988): El análisis de vegetación mediante imágenes por teledetección, en todos los indicadores consultados opera sobre la banda del infrarrojo cercano (NIR), aprovechando la alta reflectancia de la vegetación en este rango espectral, correspondiente a la banda TM4 (0.76-0.90 $\mu$ m) y la alta absorción del pigmento de luz roja, propia de la banda TM3 (0.63-0.69 $\mu$ m) (Jensen, 2000).

El indicador SAVI puede detectar áreas con cubierta vegetal baja del orden del 15%, mientras que el NDVI original resulta más eficaz en áreas con cobertura vegetal mayor, por encima de 30% (Ray, 1994). El indicador SAVI para describir vegetación, se define por la siguiente ecuación (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + l)}{NIR + Red + l} \quad (1)$$

Donde *l*, es un factor de corrección que va de 0 para altas densidades a 1 para densidades muy bajas. El factor recomendado es 0.5 (valor medio) para densidad de vegetación urbana intermedia que corresponde a ciudades en zona subtropical y con incorporación de arbolado urbano aceptablemente extendida.

- **MNDWI: (Modified Normal Difference Water Index)** (Wu, Jiang, Zhou, Zhang, & Zhang, 2005):

$$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR} \quad (2)$$

Donde el GREEN (verde) corresponde a la banda TM2, y el MIR, del infrarrojo medio, a la banda del TM4. Este indicador maximiza la reflectancia del agua mediante el uso de las longitudes de onda verde y minimiza la baja reflectancia en MIR, propias de las características del agua y aprovecha la alta reflectancia del MIR característico de la vegetación y del suelo desnudo para la diferenciación. Como resultado, el agua tiene valores positivos y la vegetación y el suelo son suprimida debido a que toma valores de cero o negativos.

- **NDBI: (Normal Difference Building Index)** (Zha, Gao, & Ni, 2003):

El indicador NDBI, describe las zonas con uso de suelo con construcción o edificación urbana, caracterizado por mayor reflectancia espectral en la longitud de onda correspondiente al infrarrojo medio: MIR, que en la cercana: NIR.

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (3)$$

Este algoritmo busca la detección-interpretación espectral entre el infrarrojo medio y cercano (MIR y NIR). Debe prestarse atención en la lectura del área construida con las de otras superficies, ya que la vegetación con bajo tenor de humedad en el follaje o el agua en los casos que tiene alta concentración de materia suspendida puede reflejar más MIR que NIR por el cambio de pico de reflectancia. Por tanto, debe considerarse particularmente la vegetación seca y el agua con alto tenor de materia en suspensión, ya que puede presentar valores de NDBI positivos en la ecuación precedente, incorporando error en la lectura de zonas urbanizadas. Si sólo se emplea el NDBI para calificar área urbana, algunos estudios han detectado una precisión de lectura del orden del 78% (Xu, 2007).

#### 2.4 Análisis de imagen por indicadores: SAVI, NDWI y NDBI.

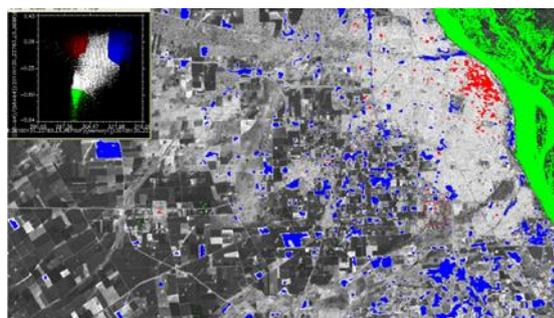


Fig. 3: Pixelado color sobre la imagen Landsat TM5. Sectores indicados: construcción (rojo), parcelas agrícolas (azul) y agua (verde).

El comportamiento descriptivo de los indicadores temáticos y su distribución en el territorio de análisis se muestra en la figura 3. La distribución de indicadores temáticos se expresa como extremos de la nube de puntos de la imagen en el ángulo superior izquierdo de la captura de pantalla. Se evidencia la posibilidad interpretativa que permiten los indicadores temáticos coloreados en áreas de neta definición de uso de suelo: área densa edilicia urbana (rojo), cuenca hídrica del Paraná (verde) y parcelas de cultivo de alto desarrollo (azul).

La imagen por indicadores SAVI, NDWI y NDBI, de vegetación, agua y construcción, permite reducir a tres bandas interpretativas en lugar de las siete originales del Landsat TM5. La imagen en tres bandas temáticas, describe ahora de manera simplificada los usos principales del suelo y facilita la identificación. La figura 3 muestra sobre una base salpimentada, suelo denso construido (rojo), parcelas rurales vegetadas (azul) y agua (verde). Estudios comparativos en más de 10 ciudades por indicadores temáticos descriptos por bandas alcanza una precisión del orden del 95%, lo que lo convierte en una herramienta fiable a escala urbana (Xu, 2007).

#### 2.5. Análisis por zonas urbanas.

Las ciudades se caracterizan por la presencia de microclimas con temperaturas diferenciadas en la extensión de la mancha urbana. Pueden registrar en el área central valores mayores a las de periferia o las del área periurbana. El fenómeno denominado "isla de calor urbano (ICU)" asociado al sobrecalentamiento del área central de mayor densidad edilicia derivado del incremento de masa térmica por unidad de superficie, además de considerar otros factores, debe contemplar que se produce en un marco de variabilidad diaria y estacional de las temperaturas ambiente. Algunos estudios detallados, indican que la ICU en la evolución diaria de

temperaturas presenta la inversión de la diferencia entre centro-periferia. Este reconocimiento basado en mediciones y estudios estadísticos aceptables ha iniciado el camino de observaciones del fenómeno inverso: "isla de frío urbana: IFU", tal como ocurre en este trabajo, en momentos específicos del día.

Sobre imágenes satelitales captadas por la plataforma Landsat TM5 del territorio que incluye la ciudad de Rosario se circunscribe el área de estudio al espacio propiamente urbano y luego el análisis sectorizado a partir de las diferentes densidades edilicias. No se ha considerado la extensión geopolítica del Gran Rosario que incorpora un extenso conglomerado desde la ciudad de San Lorenzo al norte hasta la ciudad de Villa Gobernador Gálvez al sur, sino que simplemente se analiza el área propiamente urbana Rosario, debido a que la mancha urbana extendida incorporaría áreas sin continuidad edificatoria que introduce heterogeneidades abruptas en el análisis, tal como se observa en la figura 4.

Sobre la imagen de la trama urbana se establecieron cinco zonas de diversa densidad edilicia, de I a V, de centro a periferia, adjudicándole ZONA I al área central y ZONA V a los barrios de periferia. Cada zona ocupa una superficie de poco más de una 100 hectárea (10 cuadras x 10 cuadras), definida en la imagen por 1600 píxeles, con una interpretación espacial de 30m x 30m de superficie terrestre por pixel. Ésta resolución radiométrica de los sensores permite detectar las variaciones de energía espectral recibida. La sensibilidad se expresa en resolución de 2 bits, equivalente a 256 niveles digitales (0 a 255).

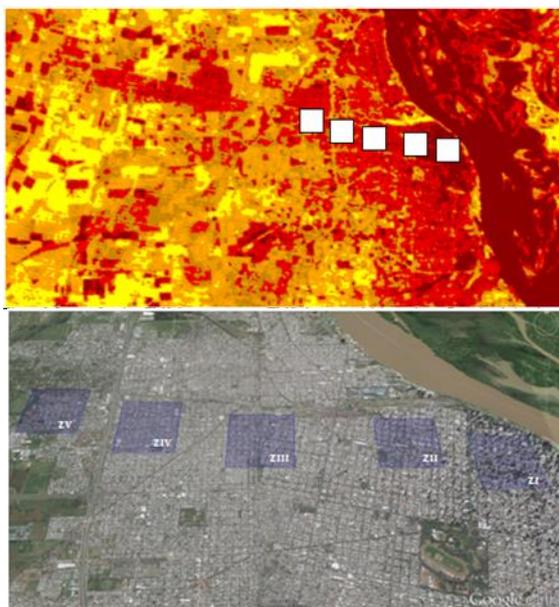


Fig.4: Imagen Landsat TM5 de temperaturas (TM6) de verano del área urbana: Rosario, el río y la zona rural próxima / Ampliación de la imagen urbana indicando las cinco zonas sobre Google Earth.

### 3. SITUACIONES ANALIZADAS Y RESULTADOS.

#### 3.1. Análisis por zonas urbanas.

Las temperaturas superficiales terrestres: TST (Land Surface Temperature, LST) detectadas por el sensor (Banda 6) que cubre en el infrarrojo lejano (10.40  $\mu\text{m}$  a 12.50  $\mu\text{m}$ ) se

presentan en las tablas 1 y 2, para un único día tipo correspondiente a cada periodo.

#### 3.2. Período invernal.

La distribución de frecuencias de TST discriminados por zonas indica por sombreado la tendencia creciente de los registros desde la zona centro (I) a periferia (V) con un aumento de TST de 3C a 4C para la totalidad de los días analizados.

Las lecturas de invierno, en acuerdo con la bibliografía consultada, presentan siempre menos claridad en la distinción de áreas construidas y vegetadas que en verano por la pérdida de follaje de las especies caducas, el menor tenor de humedad en las especies perennes (Xu, 2007) y la lectura de suelo desnudo bajo vegetación sin hojas.

#### 3.3. Periodo verano.

Las TST medias por zonas para verano indican, al igual que en el periodo frío, el incremento de registros desde el centro a la periferia, con diferencias de las medias de 2C a 4C a y desviación aceptablemente baja por zonas (máxima de 1,2C).

Tabla 1: Distribución de frecuencias estadística de TST por zonas, correspondiente a un día tipo del periodo invernal.

		20070621				
Temperaturas		Frecuencia				
°K	C	I	II	III	IV	V
mayor...	mayor..	0	0	0	0	0
289	16	0	0	0	0	2
288	15	0	0	0	0	11
287	14	4	0	10	0	95
286	13	3	31	18	7	262
285	12	3	28	22	24	295
284	11	21	87	96	246	436
283	10	57	303	350	541	299
282	9	173	415	469	542	166
281	8	531	546	551	179	18
280	7	275	85	66	29	5
279	6	349	87	18	11	9
278	5	88	18	0	4	2
277	4	83	0	0	6	0
276	3	13	0	0	4	0
275	2	0	0	0	5	0
274	1	0	0	0	2	0

Para las TST máximas por zonas se incrementa la diferencia, con DT=5C de centro a periferia. Esta tendencia de mayores temperaturas máximas en periferia que centro, ha sido apuntada por otros autores e indican que este fenómeno de refrescamiento central es más evidente en verano: "Las temperaturas medias de las máximas son (...) más elevadas en las estaciones periféricas y con menor edificabilidad,

expuestas a un mayor y más rápido caldeoamiento del suelo y del aire, calor que pierde también con mayor rapidez durante la noche (...) puede afirmarse que las áreas densamente urbanizadas, al menos en este ámbito mediterráneo, ofrecen temperaturas diurnas más bajas y mínimas más elevadas que su entorno menos construido o no urbanizado" (Pérez González, García Rodríguez, & Guerra Zaballos, 2003).

Tabla 2: Distribución de frecuencias estadística de TST por zonas, correspondiente a un día característico del periodo cálido.

		20100120				
Temperaturas		Frecuencia				
°K	°C	I	II	III	IV	V
310	37	0	0	10	24	8
309	36	0	35	22	75	22
308	35	1	52	69	190	102
307	34	4	149	112	475	430
306	33	50	439	525	632	681
305	32	296	657	691	141	309
304	31	463	163	166	40	19
303	30	421	67	5	12	7
302	29	221	28	0	8	8
301	28	120	8	0	3	2
300	27	22	2	0	0	0
299	26	2	0	0	0	0

Si se comparan los datos de TST medios de verano con los de invierno, se nota que la diferencia de TST centro-periferia es menor y se puede ver que la tendencia de crecimiento tiene una pendiente más leve que en los registros medios obtenidos de invierno, e incluso se ve una caída de zona IV a V que se explica más adelante según los índices temáticos de verano.

Los valores medios NDBI (construido) de Zona I a Zona V, es menor que la esperada para todas las zonas, con registro medios de NDBI= 0,12. Si bien se percibe el esperado decrecimiento del índice que relata la pérdida de ocupación de suelo construida este no es particularmente destacado.

La lectura de los valores medios de SAVI (vegetación) tiene un comportamiento mucho más claro, que indica dos escalones de incremento de vegetación de centro a periferia, en concordancia con el relato visual perceptivo esperado. Un primer salto con un aumento menor de Zona I a II, un mantenimiento de los valores en Zona II, III y IV y un nuevo incremento de Zona IV a V y más pronunciado que el del primer escalón

#### 4. CONCLUSIONES

##### 4.1. Análisis global de resultados por zonas urbanas en invierno y verano.

Tanto para los días analizados en ciclo verano como invierno se verifica el incremento de temperaturas medias desde el

centro (Zona I) a periferia (Zona V) al momento de paso satelital. En invierno, el incremento en valores medios de TST de centro a periferia registra diferencias de 4C a 5C. Incremento siempre registrado en todas las zonas analizadas con desviación estándar que no superan 1,7C por zona.

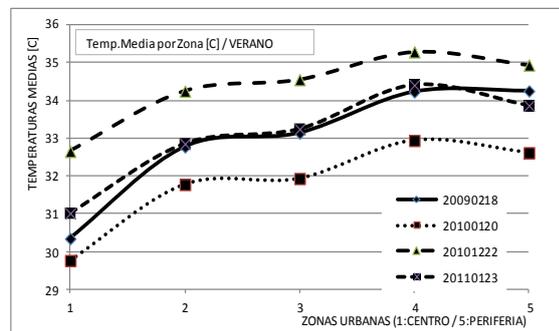
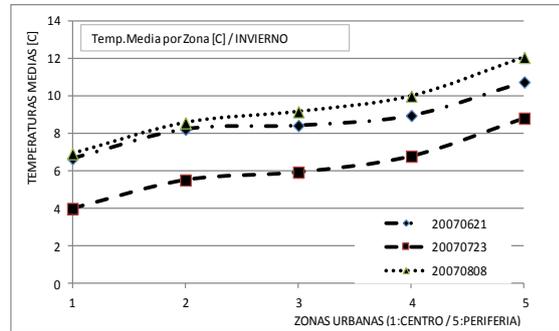


Fig. 5: Distribución de TST media por Zonas para periodo invernal y estival.

En verano, el incremento en valores medios de TST de centro a periferia es menor, va de 2,3°C a 3,9°C de diferencias, siempre con desviación estándar de los registros por zonas que no superan 1,3°C. Del análisis comparado verano-invierno se pueden indicar algunas cuestiones generales:

- En ambas situaciones estacionales se verifica incremento de temperaturas superficiales medias del centro a la periferia.
- Baja dispersión intrazona de los registros.
- Las diferencias de TST media de centro a periferia es mayor en invierno que en verano.

La mayor diferencia térmica centro-periferia en invierno que en verano, permite inferir conclusiones preliminares previa enunciación de algunas consideraciones. Se separan las hipótesis en dos partes para facilitar el análisis; unas derivadas del directo efecto de la radiación diurna/nocturna y otras, derivadas de la respuesta de las superficies terrestres. Esto puede observarse en la figura 5.

El estudio se realiza en las siguientes condiciones operativas:

- análisis en días alta heliofania.
- la hora de paso satelital es HOA=10:46h, es decir casi 2,5h antes de mediodía solar aproximadamente.
- el ángulo de incidencia solar a ese momento es sustancialmente distinto en verano e invierno sobre plano horizontal. El sol<sub>(-2.5h)</sub> se ubica con ángulos de altitudes de 50°/60° en verano y de 25°/30° en invierno.
- los registros instantáneos correspondientes a esa hora de radiación sobre plano horizontal en cada período son muy distintos. Prácticamente se duplica de verano a invierno, de 500W/m<sup>2</sup> a 250W/m<sup>2</sup>.

Del estudio en invierno se interpreta:

- Según el asoleamiento el ciclo diurno de calentamiento superficial se encuentra en los primeros momentos de radiación solar y por tanto el efecto inercial de las temperaturas nocturnas aún ejerce influencia sobre masas construidas, lo que permite inferir la presencia por retardo térmico del refrescamiento nocturno que aprovecha la buena difusividad de los materiales de construcción tradicionales. Este refrescamiento nocturno se registra por intercambio convectivo nocturno con el aire más frío combinado con el efecto de la radiación nocturna para cielo visible despejado. En consecuencia por efecto de la inercia térmica en las áreas con mayor masa constructiva en zonas de más densidad edilicia muestra su efecto y se verifican diferencia de Zona I (centro) a Zona V (periferia) de  $DT=5C$ .
- El detalle de este incremento de  $TST_{media}$  pasa de zona centro a primer anillo con un  $DT=2C$  y se estabiliza en zonas de densidad media y vuelve a incrementarse en periferia.

Del estudio en verano:

La tendencia de sobrecalentamiento en periferia se mantiene pero la diferencia de registros medios con el centro es menor:  $DT=3C$ . El efecto inercial antes

- descripto deja lugar a las primeras horas de calentamiento superficial de la masa insolada. El efecto de la radiación solar con más tiempo de exposición y mejor ángulo de incidencia sobre la superficie construida urbana naturalmente presenta registros sustancialmente más altos que en invierno, ya se ha encubierto el refrescamiento nocturno descripto en el caso de invierno. En estas condiciones las  $TST$  en centro y periferia tienden a presentar valores medios con menos diferencia que en invierno. Al tiempo, la difusividad propia de los materiales de construcción permite una menor respuesta superficial de la temperatura mientras se produce el inicio del proceso de carga térmica en masa.
- El detalle por zonas muestra un mayor salto incremental de  $TST$  de zona central (Zona I) en comparación con las inmediatas siguientes (Zona II y III), con registros medios estables en estas zonas, que resulta coincidente con la ocupación porcentual de suelo "construido" y la densidad edilicia relativa.
- Finalmente se percibe una caída de los valores medios cuando se analiza zona V, periferia clásicamente barrial, caracterizada por menor densidad edilicia y buena vegetación en la ocupación del suelo, que impacta claramente en los registros.

#### 4.2. Indicadores temáticos por zonas de construcción y vegetación.

Ahora bien, si el análisis se realiza considerando la respuesta óptica (en visible e IR) superficial, tanto diurna como nocturna, cabe indicar que los materiales y tecnologías usados en las áreas de suelo ocupadas por construcción de nuestras ciudades, y en Rosario igual, son los mismos en centro y periferia. La diferencia se expresa por la influencia porcentual relativa de ocupación de las áreas construidas y las de vegetación.

En la figura 6 se muestra para días tipo de verano la misma tendencia en los registros, con brusca caída en los días analizados en la zona de periferia (5) para los índices de

construcción (NDBI) media. La lectura del espacio urbano Rosario, coincide con el registro del índice NDBI, con ocupación de suelo cuasi homogénea en las cuatro zonas iniciales, levemente mayor en zona 1: centro, que en las inmediatas siguientes 2, 3 y 4 y caída en zona 5 del nivel de ocupación del suelo urbano construido. Por su parte, la descripción mediante índices de vegetación media SAVI, presentadas en la gráfica verifica el registro inverso que en el NDBI, ya que muestra el brusco crecimiento al pasar de zona 4 a 5. Es decir, indica el incremento de vegetación en la ocupación de suelo en zona 5 frente a registros prácticamente constantes y menores en las otras cuatro zonas.

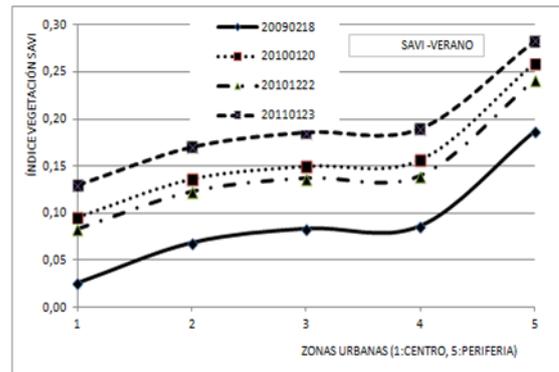
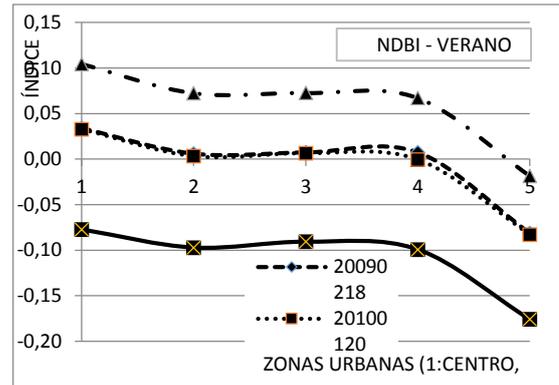


Fig. 6: Índice NDBI medio (construcción) y el Índice SAVI por zonas de centro (1) a periferia (5).

Si se combina ambas gráficas podemos indicar que en periferia, se ha reemplazado el suelo construido por vegetación y en consecuencia el efecto inercial del primero ha perdido peso relativo. La disminución de construcción visible y el incremento de vegetación son en consecuencia responsables del efecto sobre las  $TST$ , en especial en verano al cubrir suelo en muchos casos pavimento o suelo desnudo de comportamiento térmico diferente.

#### 4.3. Temperaturas superficiales urbanas.

El efecto durante las primeras horas de la mañana que determina la aparición de "islas de frío urbanas" en contraposición con la opinión tradicional de continuidad diaria de la "isla de calor urbana" ha sido detectada en varios trabajos (Valor, Caselles, Coll, Sanchez, Rubio, & Sospedra, 2000); (Akbari & Pomerantz, 2001); (Svensson & Eliasson, 2002) y (Pérez González, García Rodríguez, & Guerra Zaballos, 2003). Las diferencias de  $TST_{medias}$  centro periferia, a las -2,5h solar, son un poco más pronunciadas en invierno que en verano. Las razones presuntivas de este comportamiento diferenciado estival pueden adjudicarse a la etapa del ciclo de calentamiento/enfriamiento de día

soleado/noche diáfana, en función de la hora solar de lectura en las distintas épocas del año. En estas condiciones, la masa térmica urbana puede amortiguar y retardar el efecto por acumulación/re-entrega inercial de energía y la densidad edilicia central de Rosario introduce a escala urbana un retardo estimado de 2 a 3 horas.

En relación a la pérdida de densidad edilicia periférica y su reemplazo por vegetación, como efecto combinado, permite especialmente en verano la lectura de disminución térmica, mientras que en invierno la pérdida de follaje resulta en incremento de las TST aún con menores niveles de irradiación solar.

Se distinguen tres sectores dentro de las cinco zonas originalmente dispuestas. Dentro de la tendencia global de crecimiento de TST en invierno y verano se presentan dos escalones. El primero y más evidente se produce entre zonas I a II, de zona central de muy alta densidad edilicia a la siguiente, tal como se observa en la figura 7. Este primer escalón es del orden de 2C en invierno y de 4C en verano. La lectura topológica de zona I es de plena ocupación edilicia del suelo, con mínima aparición de suelo permeable o vegetación y alta heterogeneidad espacial, ya que se caracteriza por edificios de altura (30m promedio) con antiguas viviendas de menor porte (5m promedio) y los consiguientes espaciados intersticiales. La zona siguiente (zona II), disminuye levemente el nivel de impermeabilización de suelo, aumenta mínimamente la vegetación y el perfil de construcción tiene menos contraste.



Fig.7: Imágenes ilustrativas de la trama urbana de zona I y II en Rosario.

El segundo escalón de TST ocurre de zona IV a V, con comportamiento estacional diferenciado. Mientras que en invierno continúa la pendiente de aumento de TST, en verano se produce la disminución de registros. Para ambos momentos con pendiente opuesta tienen un DT= +2C invierno y DT= -0.5C en verano, como se observa en la figura 8. En la descripción de la ocupación de suelo, tanto zona II y III tiene trama urbana consolidada y homogénea y luego zona

IV y V son los barrios de menor densidad y presencia de suelo construido y no construido en porcentajes equivalentes. La altura de la edificación es constante y baja. La variable más distintiva es el paulatino incremento del nivel de vegetación en la ocupación de suelo, tanto en las calles: "vegetación en línea" como dentro del manzanero por patios internos más vegetados y aparece la variable a considerar: vegetación.

En relación a los registros extremos de TST, siempre de interpretación más compleja por su condición de límite, en el caso de las máximas se ubica en zona V y se puede adjudicar a la aparición de suelo desnudo en periferia. El suelo seco sin vegetación rápidamente incrementa la temperatura de superficie, dependiendo su inercia del tenor de humedad superficial. En cuanto a los picos de mínima se registran en general en zona I: centro; y se puede asociar a zonas con baja irradiación solar, tales como las áreas de sombreado permanente urbano y a la inercia térmica de la masa construidas ya apuntada.

En todos los casos a lo largo de la ciudad y para cada zona (de I a V), la composición edilicia responde a la misma tipología constructiva tradicional masiva con empleo de materiales convencionales por lo que los registros extremos de TST, en especial de máxima, ocurren en presencia de grandes superficies: de cubiertas (supermercados, fábricas, etc.) o de suelo pavimentado (autopistas, grandes estacionamientos o playas de maniobras de ferroviarias).

Tanto los registros de máxima como de mínima extremos de TST se producen coincidentemente, tanto en verano como invierno, en la misma zona; mínimas en zona I y máximas en zona V. Las mínimas pueden adjudicarse a la mayor masa edilicia de la zona central por las razones ya enunciadas y las máximas a la respuesta térmica del *suelo desnudo* intercalado en la trama urbana de borde en periferia, que la bibliografía indica como de rápido calentamiento superficial

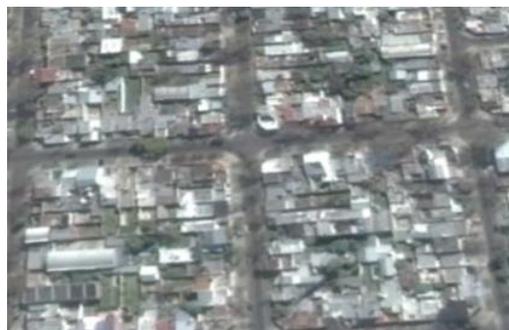


Fig. 8: Imágenes de la trama urbana de zona IV y V en Rosario.

Finalmente, la descripción de ICUs/IFUs mediante la interpretación de imágenes satelitales, muestra ser una

herramienta útil, con las naturales prevenciones propias de un método indirecto, remoto e instantáneo de lectura, a escala urbana. Naturalmente la respuesta de la herramienta es proporcional a la cantidad de imágenes disponibles, tanto en número como en la variación horaria, que relatan los distintos "momentos" del clima urbano.

#### REFERENCIAS

- Aggarwal, S. (2003). Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology: *Proceedings of the workshop*. Dehra Dun, India.: World Meteorological Organization.
- Correa, E., Flores Larsen, S., & Lesino, G. (2003). Isla de Calor Urbana: Efecto de los pavimentos. *ASADES Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente*, 7, 2., 11.25-11.30.
- Correa, E., Martinez, C., & Cantón, M. (2008). Influencia del uso de distintas magnitudes forestales sobre el comportamiento térmico de los cañones urbanos. *Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente* 12, 155-162.
- Escolano, S. (2011). Sobre la medición de la forma del espacio urbano: Aplicación a Santiago de Chile y a Zaragoza. Madrid, España.: Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación.
- Fernandez Córdoba, J., & García Millan, N. (2013). Caracterización de la islas frescas urbanas -IFU- en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *Entorno geográfico* 9, 122-144.
- Garibotti, C. (10 de 2011). Voces en el Fenix. Obtenido de Sostenibilidad y energía en ambientes urbanos.: <http://www.vocesenelfenix.com/content/sostenibilidad-y-energ%C3%AD-en-ambientes-urbanos>.
- Gridharan, R., Ganesa, S., & Lau, S. (2004). Daytime urban heat island effect in highrise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36.
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25., 295-309.
- Moffat, A., & Schiler, M. (1981). *Landscape design that saves energy*. New York: William Morrow and company.
- Oke, T. (1978). *Boundary Layer Climates*. London.: Methuen.
- Pérez González, M., García Rodríguez, M., & Guerra Zaballo, A. (2003). Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense N°* 23, 187-206.
- Rizwan, A., & Dennis, Y. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of environmental science*, 120-128.
- Sobrino, J., Jimenez Muñoz, J., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 434-440.
- Wu, H., Jiang, J., Zhou, J., Zhang, H., & Zhang, L. (2005). Dynamics of urban expansion in Xi'an City using Landsat TM/ETM data. *Acta Geographica Sinica*, 60, 143-150.
- Xu, H. (2007). Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-oriented Index Combination Technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 73,12, 1381-1391.
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 583-594.