

## **Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos.**

Pablo Sarricolea, Enrique Aliste, Pamela Castro y Cristian Escobedo

*Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago, Chile. (psarrico@uchile.cl)*

(Recibido: 21-Nov-2008. Publicado: 29-Dic-2008)

### **Resumen**

Las ciudades constituyen el hábitat por excelencia de los seres humanos, y pese a su diversidad presentan características ambientales (clima urbano) comunes en muchas partes del mundo, como por ejemplo la presencia de la Isla de Calor Urbana (ICU), que corresponde a un aumento de origen antrópico de las temperaturas de la ciudad en comparación con su entorno inmediato de carácter natural y rural, siendo más intensa dicha diferencia en las noches. Por ello, el propósito de esta investigación es analizar la Máxima Intensidad de la Isla de Calor Urbana (MIICU) de Rancagua a partir de mediciones de las temperaturas con transectos móviles y estaciones meteorológicas fijas. Se ha determinado que la máxima intensidad de la isla de calor urbana de Rancagua bordea los 6°C en verano y primavera, y 3°C para invierno y otoño. Los factores que explican las distribuciones de las temperaturas urbanas de Rancagua corresponden a las distancias a fuentes húmedas (río Cachapoal) y las densidades poblacionales; y en menor medida las características topográficas del emplazamiento de la ciudad y las áreas verdes urbanas medidas a partir del índice normalizado de diferencias vegetales (NDVI). La principal conclusión de esta investigación indica que la ausencia de parques urbanos en Rancagua explica la distribución de las temperaturas y la elevada intensidad de la isla de calor, y también la no significativa relación entre temperaturas y NDVI. De no revertirse esta situación, la sostenibilidad ambiental futura de la ciudad de Rancagua se verá muy amenazada por el crecimiento urbano.

**Palabras clave:** Clima urbano, índice normalizado de diferencias vegetales, isla de calor urbana, sostenibilidad ambiental.

### **Abstract**

*Cities are the environment for excellence in human beings, and despite their diversity, environmental features (urban climate) are common in many parts of the world, such as the presence of the Urban Heat Island (UHI). This corresponds to a temperature increase due to human activities in the city compared with its immediate natural and rural surroundings, the difference been more intense at night. Therefore, the purpose of this research is to analyze the Maximum Urban Heat Island Intensity (MUHII) of Rancagua from measurements of temperatures with mobile transects by car and fixed weather stations. It has been determined that the maximum urban heat island intensity of Rancagua is around 6 degrees Celsius in summer and spring, and 3 degrees Celsius in winter and autumn. Factors that explain distributions of the temperature of urban Rancagua correspond to the distances to humid sources (Cachapoal river) and population densities, and to a lesser extent to the topographical features of the site of the city and the urban green areas from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The main finding of this research shows that the lack of urban parks in Rancagua explains the distribution of temperatures and the high intensity of the heat island, and also the no significant relationship between the temperatures and NDVI. If this situation is not reverted, future environmental sustainability of the city of Rancagua will be greatly threatened by the urban growth.*

**Key words:** Environmental sustainability, normalized difference vegetation index, urban climate, urban heat island.

## 1. Introducción

La urbanización modifica artificialmente las condiciones climáticas a través del aumento de las temperaturas, disminución de la humedad del aire y velocidad del viento, todo lo cual favorece la consolidación de islas de calor urbanas (ICU). Estas pueden ser divididas en dos tipos: La ICU propiamente tal corresponde a la mayor temperatura que registra la capa de aire que cubre la ciudad como consecuencia de la transmisión hacia ella del calor acumulado por las estructuras y cuerpos que la componen, tales como techos y paredes de las edificaciones, calles y avenidas, sitios eriazos, industriales y estacionamientos. Todas estas superficies se caracterizan por estar construidas con materiales que almacenan y conducen gran cantidad de calor cuando reciben la insolación directa y que devuelven a la atmósfera posteriormente.

La isla de calor urbana superficial (ICUs), por el contrario, corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captados directamente por sensores infrarrojos (Sarricolea y Romero, 2006), tales como los disponibles en los satélites de observación terrestre. La ICUs no está sometida directamente a las compensaciones térmicas que realizan los flujos de aire, desde las superficies más cálidas a las más frías, y que regulan la temperatura del aire de las ciudades, por lo que cabe esperar rasgos térmicos más marcados. Las correlaciones espaciales entre las islas de calor de superficie y del aire son altas en general (Arnfield, 2003), por lo que se puede asumir que los patrones espaciales de ambas son semejantes en un alto grado, aunque no en lo que respecta a los niveles de temperatura registrados.

Respecto a la estacionalidad de la isla de calor no existe consenso. Algunos indican que es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysik y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008), y otros en invierno (Moreno, 1994; Montávez *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2007) e incluso otoño (Alonso *et al.*, 2003). También existen autores que señalan bi-estacionalidad de la máxima intensidad de la ICU: estaciones de otoño y verano (Yagüe *et al.*, 1991; Gedzelman *et al.*, 2003) y otoño e invierno (Kim y Baik, 2002). Esto demuestra que es muy difícil un acuerdo global respecto a la estacionalidad de la máxima intensidad de la isla de calor, y que ella dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su climatología.

Referido a la intensidad de la isla de calor urbana se ha detectado que es más notoria durante la noche. Unwin (1980) señala que las condiciones sinópticas nocturnas favorecen la concentración de calor, al igual que Schmidlin (1989) y Jáuregui (1997). Este último autor detectó que en ciudad de México el 75 % de las condiciones de máxima isla de calor ocurría en la noche, con diferencias de temperatura de 7,8°C. Por otra parte Guijarro (1998) atribuye la máxima intensidad nocturna de la isla de calor a la acción conjunta de la disminución de la oscilación termométrica diaria de la ciudad por los materiales de construcción y su alta rugosidad respecto a los espacios abiertos de la periferia y al aumento de la temperatura media en la zona urbana, debida a la generación de calor asociada a las actividades humanas (respiración, transporte, calefacción, etc).

Respecto a la morfología e intensidad de las islas de calor, se ha establecido que están condicionadas, entre otros factores, por la densidad de las edificaciones y la existencia de parques (Fernández *et al.*, 2004). A ello, Yuan y Bauer (2007) indican la importancia de la composición de las grandes áreas verdes, las cuales aparecen como zonas relativamente frías en comparación con las superficies construidas de su entorno. En este sentido, Oke (1995) señala que la capa límite urbana (*urban boundary layer*) se diluye hasta desaparecer en las áreas verdes (especialmente arbóreas), mientras que Moreno (1994) valida para la ciudad de Barcelona que las áreas verdes modifican y alteran la forma de la isla de calor urbana.

Se han encontrado también relaciones importantes entre las islas de calor urbanas y la topografía, tal como señalan Beral-Guyonnet (1997), Cuadrat *et al.* (2003 y 2005), y Romero y Sarricolea (2006), cuando indican que las relaciones entre ambas variables son positivas y se acentúan hacia el interior

de las ciudades, debido al menor dominio de los vientos, y se transforma así en la variable que explica significativamente la ICU. Otras investigaciones han dado cuenta de las relaciones entre la isla de calor urbana y la geometría de las calles (Eliason, 1994). Según este autor, la orientación longitudinal (Norte-Sur) de las calles y el bajo factor de visión del cielo (*sky view factor*, *SVF*) dentro del cañón urbano (*urban canyon*) influyen en las características de la isla de calor.

No obstante, a todo lo señalado se debe indicar que las relaciones más modeladas corresponden a aquellas que comparan la intensidad de la isla de calor con su entorno rural a partir de los tamaños poblacionales y estructura espacial de las ciudades. Así Oke (1982, 1987) ha propuesto relaciones que establecen las diferencias de las temperaturas urbanas y rurales ( $\Delta t = t_u - t_r$ ) en función de logaritmos de la población, encontrando diferencias en la relación para grupos de ciudades europeas de tipo mediterráneo (compactas) y las fragmentadas y extensas ciudades de carácter anglosajón. Por otra parte, Yamashita *et al.* (1986) destacaron que la densidad de edificación y la rugosidad de las ciudades influyen fuertemente en el factor de visión del cielo, aumentando la intensidad de las temperaturas del aire, lo cual resulta similar a lo señalado por Bello (1994) cuando correlaciona intensidades de la isla de calor y densidades edificadas, para distintas situaciones de estabilidad atmosférica, y Jáuregui (2005) para el crecimiento de la población de las ciudades mexicanas.

Sin embargo, la configuración espacial que adquiere la isla de calor urbana no es estable y su variabilidad temporal puede ser muy importante, estando relacionados estos cambios con la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas, como han puesto de relieve Lowry (1977) y Landsberg (1981) al relacionar las diferentes formas de la isla de calor con los flujos de viento y las condiciones sinópticas.

El conocimiento de la configuración y transformaciones del patrón térmico de la ciudad de Rancagua es un tema que no se había abordado hasta ahora. En esta investigación se demuestra la clara existencia de la ICU y las causas que intervienen en su forma e intensidad. Para ello se establecen relaciones estadísticas entre las temperaturas y algunas variables explicativas, enumerando algunas medidas de mitigación de sus efectos que contribuyan a la planificación urbana. Como método de análisis, se aplican modelos de regresión múltiple por pasos sucesivos (*Stepwise Regression Analysis*) que, a través de la incorporación sistemática y sucesiva de las variables propias de la urbanización, explica el fenómeno de la máxima intensidad de la isla de calor urbana en la ciudad de Rancagua. El propósito general entonces corresponde a determinar y analizar la máxima intensidad de la isla de calor urbana de la ciudad intermedia de Rancagua y establecer su relación con variables condicionantes de carácter geográfico-urbano. Las hipótesis que sustentan esta investigación señalan que:

- La configuración térmica nocturna de la ciudad intermedia de Rancagua debe tender a ser concéntrica, con mayores temperaturas en el centro de la ciudad y menores temperaturas en la periferia de ella tal como lo plantea Moreno (1994).
- La máxima intensidad de la ICU nocturna de Rancagua debe poseer, según la aplicación de las ecuaciones de máxima intensidad de la isla de calor urbana diseñadas por Oke (1987), magnitudes de entre 6,7 a 9,5°C, debido a los montos poblacionales que posee la ciudad (233.823 habitantes para el año 2002), lo cual será corroborado con los datos obtenidos de las mediciones *in situ* del fenómeno.
- Las variables que explicarían de mejor manera la distribución térmica de la ciudad deben corresponder a la densidad edificada, los usos y coberturas de suelo, y la topografía del emplazamiento de la ciudad, muy similar a los resultados encontrados por Cuadrat *et al.* (2005) para la ciudad de Zaragoza en España.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de Estudio

La ciudad de Rancagua se sitúa en la República de Chile (país ubicado en el suroeste de América del Sur), a unos 87 km al sur de la capital nacional que corresponde a la ciudad de Santiago. Su localización, considerando como referencia al centro fundacional de la ciudad (plaza de los héroes), es a la latitud de 34°10'13" Sur y a la longitud de 70°44'26" Oeste.

Posee un clima templado cálido con estación seca prolongada, es decir, un clima mediterráneo. Por ello, las estaciones del año se presentan muy marcadas, con veranos cálidos y secos e inviernos frescos y lluviosos. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 22 y los 7°C, y precipitan cerca de 500 mm anuales.

Su situación geográfica se enmarca dentro de la cuenca del Río Cachapoal, a unos 500 metros de altitud sobre el nivel medio del mar. La ciudad pertenece administrativamente a la comuna de Rancagua. No obstante, se encuentra conurbada con la comuna de Machalí por el Este (el límite entre ellas corresponde al estero Machalí). La población ha aumentado desde su fundación (año 1743) de manera sostenida, y ha triplicado su población total en los últimos 38 años (1970-2008), desde 86.740 hasta 273.822 habitantes (Censos de Población de Vivienda).

Simultáneamente a ello, mediciones propias realizadas sobre imágenes de satélite Landsat MSS de 1975 y Landsat TM de 2008, confirman que la superficie urbana también se ha casi triplicado en dicho periodo, desde los 10,45 km<sup>2</sup> a los 30,23 km<sup>2</sup>, alcanzando una densidad de población de 9.057 habitantes por km<sup>2</sup> en la actualidad. La localización de la ciudad se muestra en la figura 1.

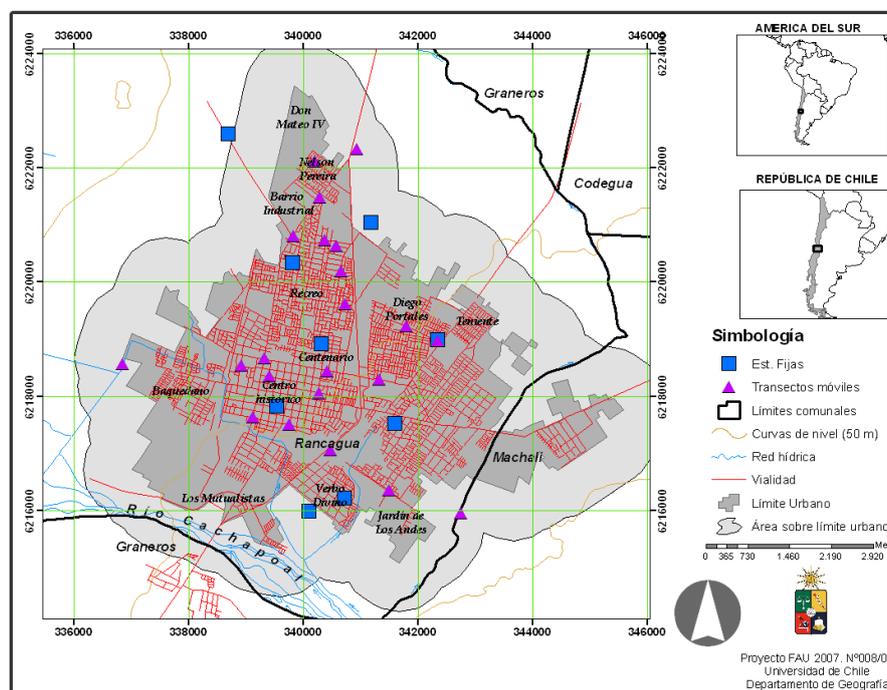


Figura 1: Área de estudio.

En esta figura se puede apreciar que el área de estudio corresponde al límite urbano de Rancagua hasta el año 2008, más un área de influencia de 800 metros fuera de la ciudad, lo cual permite observar las condiciones ambientales de sus áreas de crecimiento, y con una superficie muy similar a la propia de la ciudad (30,23 km<sup>2</sup> urbanos y 30,69 km<sup>2</sup> rurales). Rancagua ocupó en un primer momento el centro

histórico, delimitado por manzanas de estilo damero o plano *hipódamo*, y rompiendo con él en su crecimiento inicial hacia el sur (barrios Baquedano, Los Mutualistas). Posteriormente, se extendió hacia el norponiente (barrios Diego Portales, Recreo, Barrio Industrial) y, en los últimos años, su aumento de superficie urbana se orientó hacia los extremos norte y suroriente (comuna de Machalí y barrios Nelson Pereira, Verbo Divino y Jardín de Los Andes). En esta misma figura 1 se grafican los puntos (estaciones) de medición de las temperaturas en la ciudad.

## 2.2. Fases de la investigación

Los métodos aplicados se sustentan en el uso de análisis espacial y geoestadístico. Los datos de las temperaturas fueron obtenidos entre los años 2007 y 2008, para las diferentes estaciones astronómicas, y con estaciones fijas y móviles que suman un total de 31 puntos de observación. Se midió un total de 140 días con las estaciones fijas, cada 15 minutos (35 días en promedio para las estaciones astronómicas con un total de 13.440 registros) y 8 días para los transectos nocturnos (2 por estación). El soporte de análisis espacial fue el Sistema de Información Geográfica (SIG) *ArcGis desktop 9.2*, el cual permitió interpolar y extrapolar las temperaturas a partir del método geoestadístico *kriging*, que proporciona una predicción muy certera de la variación espacial de los datos (Borrough y Mcdonnell, 1998). Los materiales utilizados fueron:

- a) Bases de datos y coberturas georeferenciadas: Censo de población y vivienda, mapas 1:50.000: Permiten calcular las densidades de población, el modelo de elevaciones y las distancias a cursos de agua.
- b) Imágenes satelitales: imágenes Landsat MSS y TM de los años 1975 y 2008 e imágenes MODIS de composición de 32 días del año 2007 (para las 4 estaciones). Dichas imágenes permitieron realizar el cálculo de superficie urbana y obtener el índice normalizado de diferencias.
- c) Estación móvil de medición de temperatura: 1 estación móvil de baja inercia *Weather Wizard III*, marca *Davis*, utilizada en un vehículo que recorre la ciudad en los días seleccionados y en horario comprendido entre las 21:30 y 22:30 horas, cubriendo un total de 22 puntos de medición.
- d) Estaciones fijas de medición de temperatura: 9 termógrafos digitales marca *LogTag HAXO-8*, los cuales densifican la cantidad de puntos considerados y ayudan a corregir el desfase temporal de las mediciones de la estación móvil. Ellas registran la temperatura cada 15 minutos y durante varios días.

Para determinar la máxima intensidad de la isla de calor urbana de Rancagua, luego de obtener los resultados interpolados de las temperaturas, fue necesario calcular las diferencias de temperaturas máximas y mínimas de cada estación del año. Para la clasificación de la MIICU se utilizaron las categorías de Fernández (1996), que señalan diferencias de intensidad en función de la temperatura: intensidad débil (hasta 2°C), moderada (2 a 4°C), fuerte (4 a 6°C) y muy fuerte (mayores a 6°C). Para modelar las temperaturas se correlacionan con la distancias a fuentes húmedas, topografía, densidad de población y NDVI. Ello permite estimar el nivel de explicación de las temperaturas de la ciudad, lo cual permitirá hacer recomendaciones a la planificación de la ciudad. El esquema de la figura 2 muestra la clasificación de las variables que influyen en la ICU según Rizwan *et al.* (2008) que las agrupa en variables controlables e incontrolables. Del esquema se desprende que las estructuras de poblamiento (densidad de población, extensión urbana, soportes de transporte) y del diseño urbano (altura de los edificios, anchos de las calles, áreas verdes y materiales de construcción) pueden ser controlables a través de la planificación ambiental de las ciudades; mientras que las condiciones climáticas y meteorológicas de meso-escala no se pueden controlar. Del mismo modo, las características topográficas e hídricas del sitio tampoco son controlables. No obstante, la aptitud residencial y urbana de una localización puede considerar distancias mínimas a fuentes y corredores de humedad y posición topográfica.

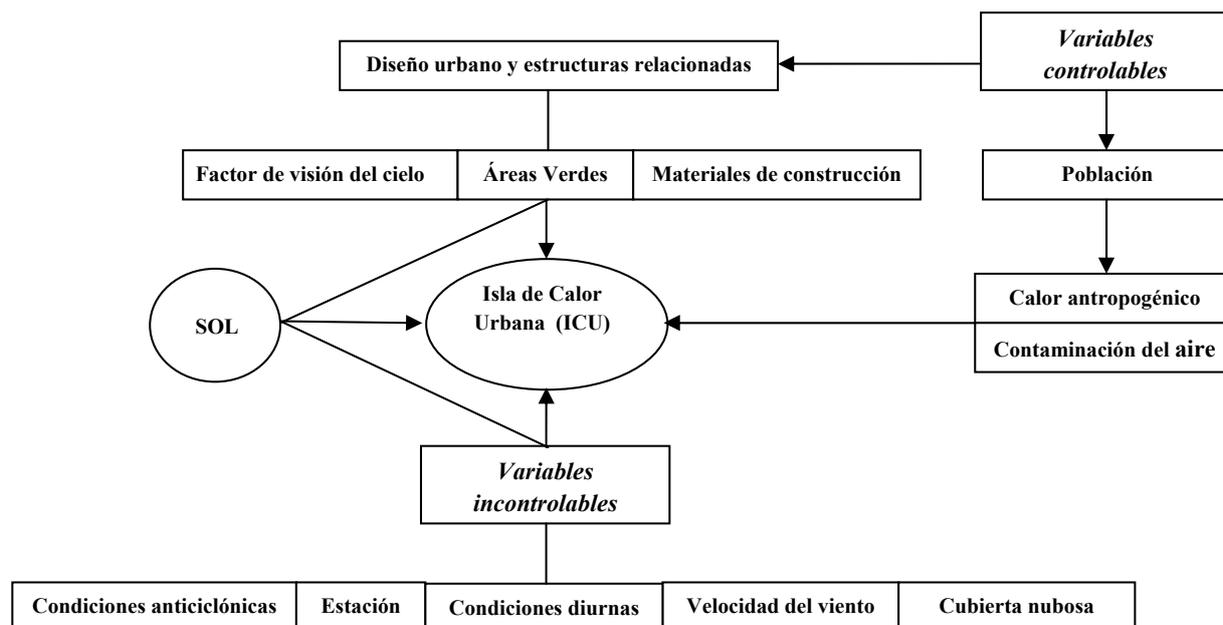


Figura 2: Esquema de variables controlables y no controlables en la generación de la isla de calor urbana, según Rizwan *et al.* (2008).

### 3. Resultados

#### 3.1. Distribución de las temperaturas e intensidad de la isla de calor urbana

Las mediciones de temperaturas para la ciudad de Rancagua fueron realizadas en condiciones de cielo despejado, a excepción de una de las mediciones de invierno, en situación pre-frontal y con cielo cubierto. No obstante, se utilizaron sólo las mediciones con cielo despejado en este estudio. La distribución de las temperaturas muestra una configuración polinuclear de ICU nocturna en Rancagua, con tres núcleos bien marcados en los barrios de centro histórico, Diego Portales y Nelson Pereira, para las 4 estaciones astronómicas del año.

En primavera y verano (figura 3) se alcanzan las máximas intensidades de la isla de calor urbana, con  $4,8^{\circ}\text{C}$  y  $5,4^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Según la clasificación de Fernández (1996) se puede catalogar la ICU de Rancagua para estas estaciones como de intensidad fuerte ( $4$  a  $6^{\circ}\text{C}$ ). Las áreas más frías tienden a situarse hacia la periferia de la ciudad, principalmente al río Cachapoal y el norponiente de la ciudad. La intensidad de la ICU es mayor en verano, pues al interior del límite urbano las diferencias de temperatura se encuentran por sobre  $4^{\circ}\text{C}$ ; mientras en la primavera, sólo los núcleos se muestran cálidos y el resto de la ciudad sólo alcanza  $2^{\circ}\text{C}$  de intensidad, disminuyendo hacia la periferia.

Durante las estaciones de otoño e invierno, la distribución de las temperaturas resultan ser similares a las de verano y primavera pero con una menor intensidad (figura 4). La intensidad de la ICU de otoño es de  $3,2^{\circ}\text{C}$  y en invierno de  $3,5^{\circ}\text{C}$ , clasificándose ambas con moderada intensidad. Hacia la periferia sur de la ciudad, en las cercanías del río Cachapoal, las temperaturas son relativamente más bajas. La intensidad de los núcleos es mayor en otoño que en invierno, tanto en extensión espacial como magnitud, siendo el barrio Nelson Pereira el más diferenciado en ambas estaciones.

En concreto, y teniendo en cuenta las cuatro estaciones astronómicas del año, se puede decir que la distribución de las temperaturas sigue un patrón concéntrico a tres núcleos, siendo siempre más intensos el del centro histórico de la ciudad y el oriental del barrio Diego Portales; el tercer núcleo, más periférico y excéntrico de todos, se presentó siempre menos intenso y extenso que los anteriormente mencionados.

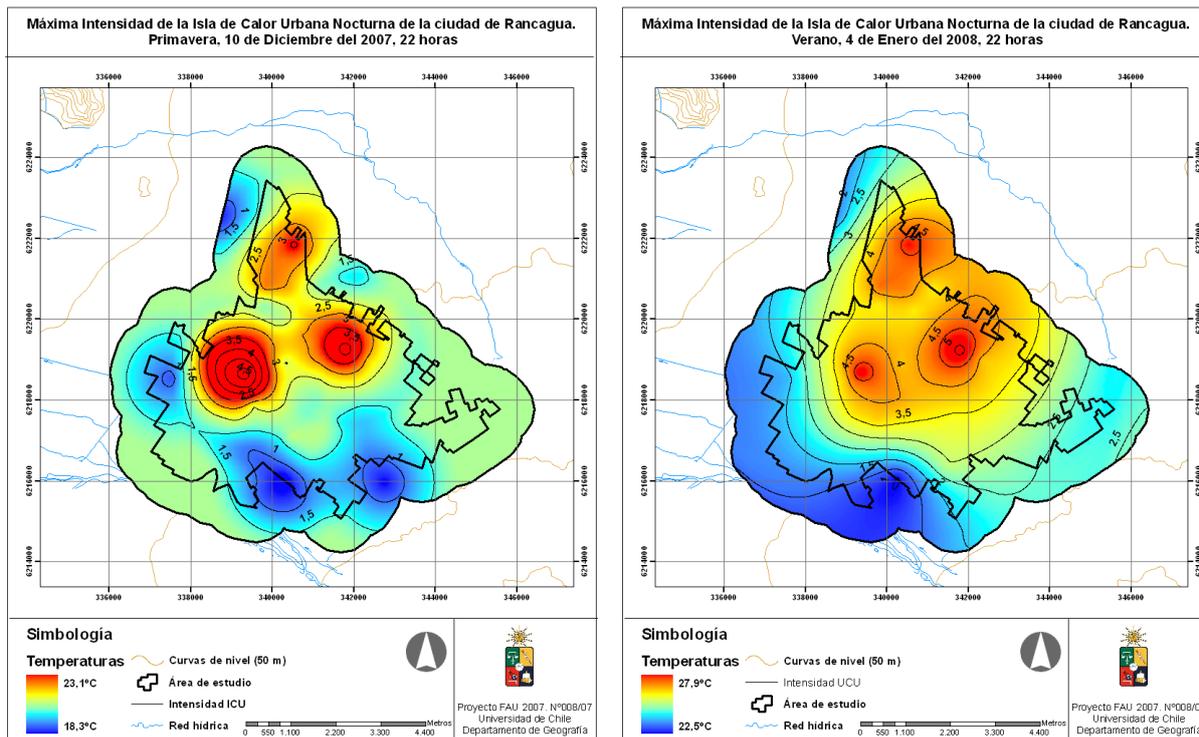


Figura 3: Distribución de las temperaturas y la intensidad de la isla de calor urbana de Rancagua en primavera y verano.

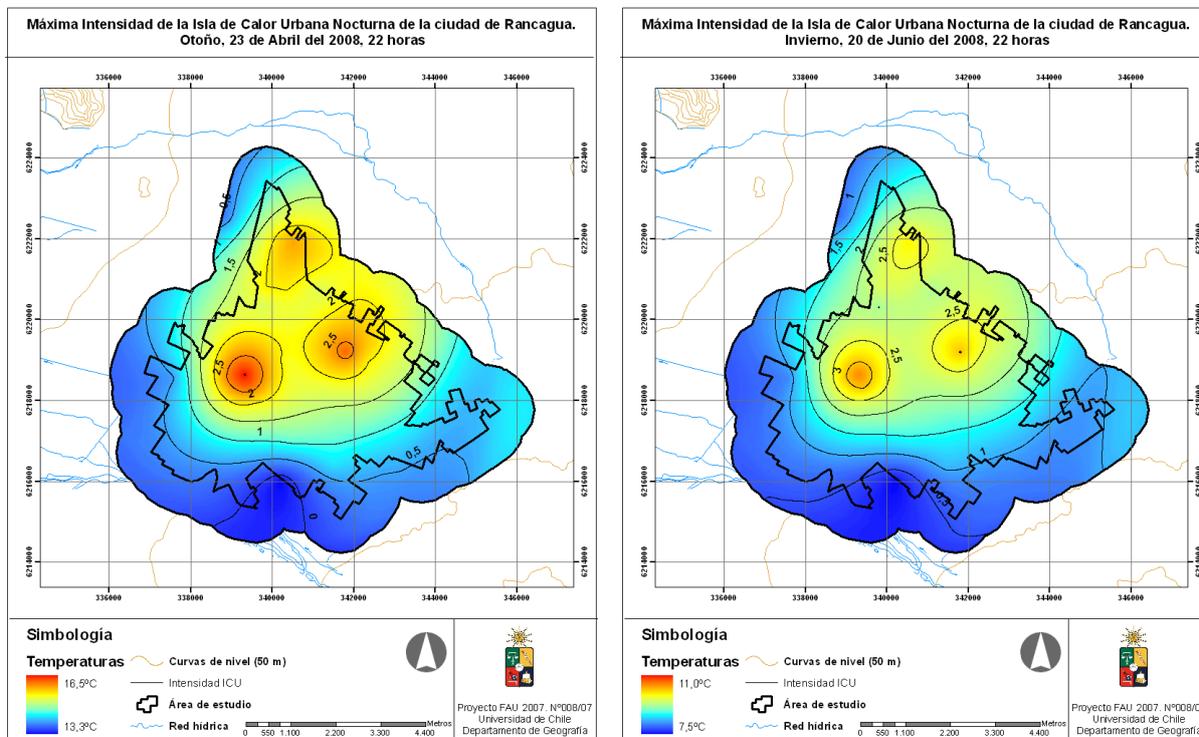


Figura 4: Distribución de las temperaturas y la intensidad de la isla de calor urbana de Rancagua en otoño e invierno.

### 3.2. Distribución de las variables explicativas de las temperaturas

Las densidades de población, que para Rancagua alcanzan en promedio los 9.000 habitantes por kilómetro cuadrado, a nivel de detalle presentan significativas variaciones, con barrios con una alta densidad (sobre 18.000 hab./km<sup>2</sup>), de localización periférica y vinculada a sitios con viviendas de 2 y 3 pisos y hogares de ingresos económicos bajos, destacando Diego Portales, Don Mateo IV, Baquedano y Teniente. El resto de la ciudad muestra densidades menores a 5.000 hab./km<sup>2</sup>, viviendas de hasta de 2 pisos y hogares de ingresos económicos medios y altos. La siguiente figura permite observar la distribución de las densidades.

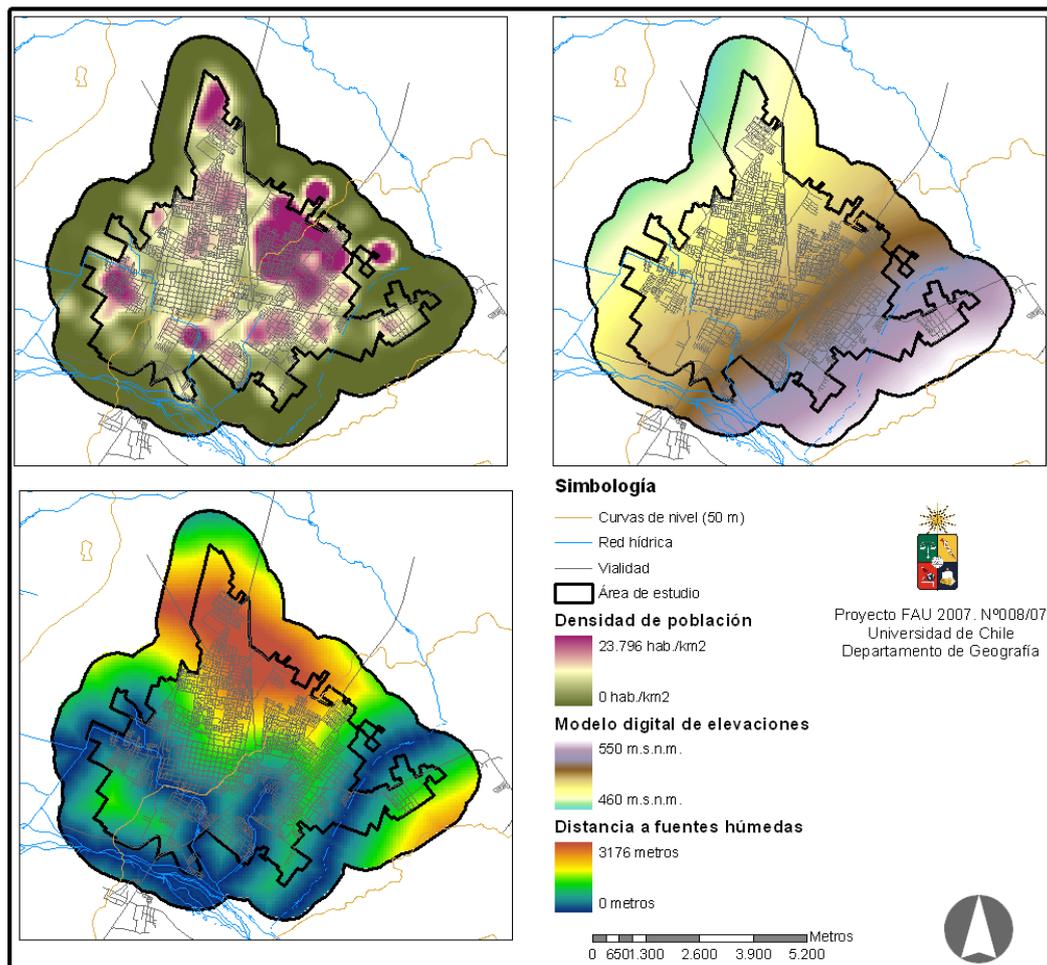


Figura 5: Distribución de las variables explicativas en la ciudad de Rancagua.

En relación a las distancias a fuentes húmedas (figura 5) destaca por el sur el río Cachapoal, por el oriente el estero Machalí y por el poniente algunos canales fluviales. La distancia promedio a fuentes húmedas en la ciudad es de 900 metros, y la máxima distancia a ellos es de 3,2 km, al área norte de la ciudad. La topografía del asentamiento urbano posee una escasa inclinación hacia el poniente de 1,5 % de pendiente y una elevación promedio sobre el nivel medio del mar de 500 metros y un desnivel total de 90 metros.

El índice normalizado de diferencias vegetales (NDVI), medido con las imágenes MODIS de composición de 32 días y pixel de 500 metros, muestra las variaciones propias de la vegetación en las distintas estaciones del año (figura 6), siendo el verano la época de mayor plenitud vegetal debido a las zonas de cultivos en las áreas rurales y la composición arbórea caducifolia de la vegetación urbana. La estación del año con menos desarrollo vegetacional es el invierno y primavera, mientras que en otoño aún persiste una buena condición de desarrollo vegetal. No obstante, dichas variaciones estacionales muestran un patrón

común en todas las estaciones del año, que corresponde al bajo nivel de NDVI al interior de la ciudad, particularmente en el centro, lo cual demuestra el poco número de parques urbanos visto en el terreno e imágenes Landsat TM 1989 y 2008.

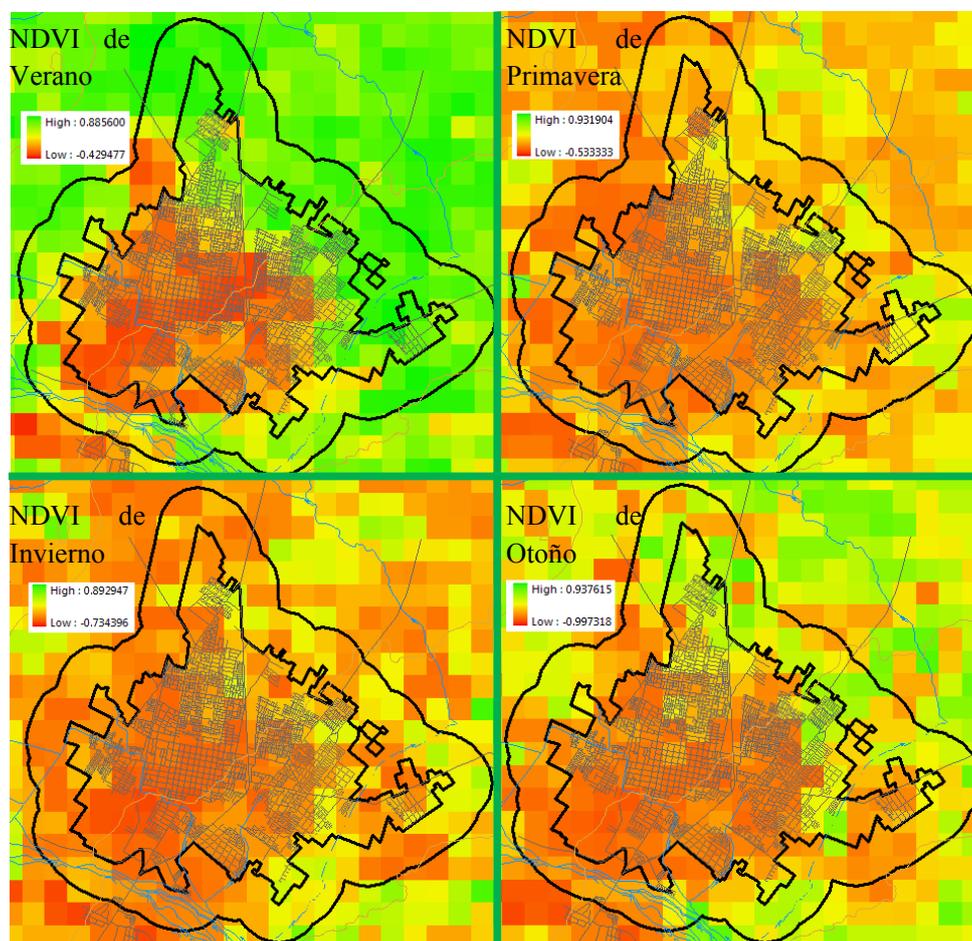


Figura 6: Distribución del índice normalizado de diferencias vegetales (variable explicativa) en la ciudad de Rancagua.

### 3.3. Modelos de regresión para explicar la intensidad de la isla de calor urbana

Para conocer y determinar la importancia de las variables urbano-geográficas sobre las temperaturas y la conformación de la isla de calor urbana de la ciudad de Rancagua se realizan, para las cuatro estaciones del año, análisis de regresión múltiple por pasos, incorporando a dicho modelo matemático las variables según la correlación que presentan con la distribución espacial de la temperatura.

Respecto a la relación estadística entre la distribución de las temperaturas y el conjunto de variables explicativas, los resultados confirman que la distancia a fuentes húmedas corresponde a la variable con mayor peso, dado que por sí sola explica entre el 16 % y 42 % de la varianza total, siendo 16 % para primavera, 42 % en verano, 26 % en otoño y 37 % en invierno (tabla 1). La segunda variable en importancia es la densidad de población, con hasta un 19 % de coeficiente de determinación para otoño, seguida por la elevación topográfica. Finalmente, la variable menos relevante en explicar el problema es la vegetación.

Los mayores niveles de explicación de las temperaturas se lograron utilizando todas las variables (tabla 1), es decir, el modelo 4, siendo el verano la estación que alcanza el máximo valor de  $R^2$ , con un 58 %, seguida del invierno con un 51 %, el otoño con un 49 % y, por último, la primavera con sólo un 27 %.

Tabla 1: Resultados del análisis de regresión múltiple entre las temperaturas y diferentes variables geográficas y urbanas.

<b>Modelo</b>	<b>R Múltiple</b>	<b>R<sup>2</sup> Múltiple</b>	<b>R<sup>2</sup> Ajustado</b>	<b>Error St.</b>	<b>Cambio en R<sup>2</sup></b>
Primavera 1	0,398	0,158	0,158	0,519	0,158
" 2	0,479	0,230	0,230	0,497	0,072
" 3	0,508	0,258	0,257	0,488	0,028
" 4	0,518	0,269	0,268	0,484	0,011
Verano 1	0,649	0,421	0,421	0,703	0,421
" 2	0,757	0,573	0,573	0,604	0,152
" 3	0,760	0,578	0,578	0,600	0,005
" 4	0,761	0,579	0,579	0,600	0,001
Otoño 1	0,505	0,255	0,255	0,633	0,255
" 2	0,669	0,448	0,448	0,531	0,194
" 3	0,689	0,475	0,475	0,518	0,027
" 4	0,702	0,493	0,493	0,507	0,018
Invierno 1	0,605	0,366	0,365	0,543	0,366
" 2	0,709	0,503	0,503	0,481	0,138
" 3	0,713	0,508	0,508	0,478	0,005
" 4	0,714	0,510	0,509	0,478	0,001

Predictores del modelo 1: (Constante), Distancia fuentes húmedas

Predictores del modelo 2: (Constante), Distancia fuentes húmedas, Densidad

Predictores del modelo 3: (Constante), Distancia fuentes húmedas, Densidad, y NDVI (verano)  
o Elevación (demás estaciones)

Predictores del modelo 4: (Constante), Distancia fuentes húmedas, Densidad, Elevación, NDVI

Las ecuaciones de la tabla 2 muestran los signos de las variables respecto a las temperaturas. Las relaciones son positivas para las distancias a fuentes húmedas, densidades de población y elevación (esta última sólo para verano), implicando que “el aumento de dichas variables significa un aumento de las temperaturas y viceversa”. Las correlaciones son negativas para NDVI y elevación (exceptuando esta última para verano), es decir, la disminución de dichas variables provoca un aumento en las temperaturas. Estos resultados son muy lógicos, pues evidencian que mayor vegetación implica una reducción de las temperaturas, mayor densidad de población también significa un aumento de las temperaturas, y la cercanía a fuentes húmedas reduce las temperaturas. En el caso de la elevación o posición topográfica los signos son distintos para las estaciones de verano y el resto del año. No obstante, predomina el hecho de que la disminución de la altitud se traduce en un aumento de las temperaturas, lo cual es concordante con el comportamiento topoclimático de las cuencas.

La sensibilidad de las ecuaciones a los cambios en los valores de las variables se puede observar en la tabla 3. Para verano, se puede decir que al aumentar en 500 metros la distancia a fuentes húmedas la temperatura aumenta 0,34°C, y al aumentar la densidad de población en 5.000 hab./km<sup>2</sup> la temperatura aumenta 0,42°C. En definitiva, y para todas las estaciones, la temperatura de la ciudad y la configuración e intensidad de las ICU son muy sensibles en Rancagua a la cercanía a fuentes húmedas y a la densidad de población. Ello no significa proponer urbanizaciones de baja densidad, sino más bien propiciar densidades adecuadas (15.000 hab./km<sup>2</sup>) en un modelo compacto de la ciudad, calles amplias que favorezcan la circulación de aire, y una mayor cobertura de áreas verdes y parques urbanos, además de direccionar el crecimiento hacia el río Cachapoal por su efecto regulador de las temperaturas (hasta una distancia fuera de los riesgos de inundación) para así, mitigar los efectos de la isla de calor urbana.

Tabla 2: Regresión múltiple para el modelo 4, constantes y coeficientes  $\beta$  de la ecuación para las estaciones del año.

Modelo	VARIABLES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	$\beta$ PARA COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS
Primavera	Constante en °C	21,449900
	Distancia a fuentes húmedas en metros	0,000200
	Densidad de población (hab./km <sup>2</sup> )	0,000037
	Elevación en m.s.n.m	-0,003500
	NDVI primavera (-1 a 1)	-0,628600
Verano	Constante en °C	23,647800
	Distancia a fuentes húmedas en metros	0,000700
	Densidad de población (hab./km <sup>2</sup> )	0,000085
	Elevación en m.s.n.m	0,000900
	NDVI verano (-1 a 1)	-0,459500
Otoño	Constante en °C	15,127900
	Distancia a fuentes húmedas en metros	0,000400
	Densidad de población (hab./km <sup>2</sup> )	0,000062
	Elevación en m.s.n.m	-0,002100
	NDVI otoño (-1 a 1)	-0,250000
Invierno	Constante en °C	9,289900
	Distancia a fuentes húmedas en metros	0,000400
	Densidad de población (hab./km <sup>2</sup> )	0,000063
	Elevación en m.s.n.m	-0,001800
	NDVI invierno (-1 a 1)	-0,236100

Tabla 3: Resultados de los modelos de regresión múltiple para las distintas estaciones y la reacción de la temperatura a los cambios de los valores en las variables explicativas.

Estación	VARIABLES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	Cambios en la temp. (°C)
Verano	Aumento de la distancia a fuentes húmedas en 500 metros	+0,34
	Aumento de la densidad de población en 5.000 hab./km <sup>2</sup>	+0,42
	Aumento en el NDVI en 0,5	-0,22
	Aumento en la elevación de 50 metros	+0,05
Primavera	Aumento de la distancia a fuentes húmedas en 500 metros	+0,11
	Aumento de la densidad de población en 5.000 hab./km <sup>2</sup>	+0,18
	Aumento en el NDVI en 0,5	-0,18
	Aumento en la elevación de 50 metros	-0,31
Otoño	Aumento de la distancia a fuentes húmedas en 500 metros	+0,21
	Aumento de la densidad de población en 5.000 hab./km <sup>2</sup>	+0,31
	Aumento en el NDVI en 0,5	+0,12
	Aumento en la elevación de 50 metros	-0,11
Invierno	Aumento de la distancia a fuentes húmedas en 500 metros	+0,21
	Aumento de la densidad de población en 5.000 hab./km <sup>2</sup>	+0,32
	Aumento en el NDVI en 0,5	+0,11
	Aumento en la elevación de 50 metros	-0,09

En este sentido, para Rancagua, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2007) ha catastrado un total de 1,5 km<sup>2</sup> de sitios eriazos (libres sin edificación) en los cuales es posible proponer edificios y parques urbanos en los predios más grandes, tal como muestra la figura 7.

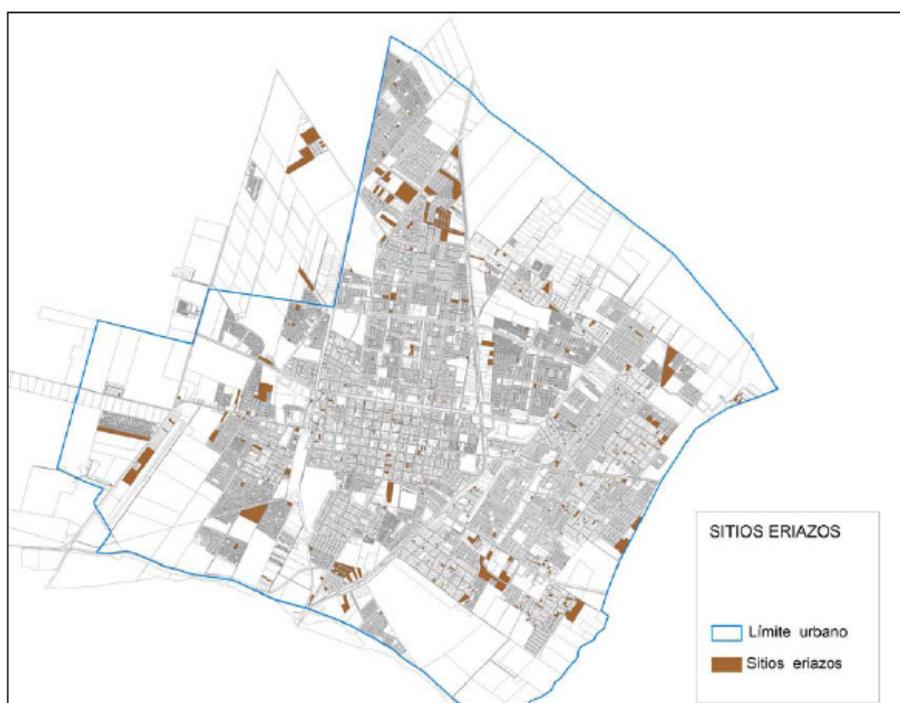


Figura 7. Sitios eriazos de Rancagua. (Fuente: MINVU 2007).

#### 4. Conclusiones

La configuración térmica nocturna de la ciudad de Rancagua es poli-concéntrica, con mayores temperaturas en el Centro histórico, Diego Portales y Nelson Pereira, disminuyendo las temperaturas hacia la periferia, especialmente la sur y poniente, de modo similar a lo observado por Moreno (1994) para Barcelona. La estación del año no es relevante en dicha distribución, pero sí lo es respecto a la intensidad de la ICU, que se presentó mayor en verano y primavera para esta ciudad.

La máxima intensidad de la isla de calor nocturna de Rancagua posee magnitudes de entre 5,4°C y 3,2°C, algo menor a lo esperado en las ecuaciones de Oke (1987), que predicen una intensidad de 6,7°C para una ciudad compacta. Ello se considera dentro del margen de aproximación de la ecuación de Oke, ya que su modelo es universal.

Las variables que explican de mejor manera la distribución térmica de la ciudad corresponden de mayor a menor a la distancia a fuentes húmedas, la densidad de población, la topografía del emplazamiento de la ciudad, y el NDVI. Ello resulta similar a los resultados encontrados por Cuadrat *et al.* (2005) para la ciudad de Zaragoza en España. No obstante, la cercanía a fuentes húmedas es muy significativa para el caso de Rancagua, lo cual es un elemento importante a considerar en la planificación urbana y ambiental de esta ciudad.

Un elemento importante de los resultados es la poca significancia encontrada entre las temperaturas y la vegetación expresada en NDVI. Ello evidencia la clara ausencia de parques urbanos en Rancagua y su composición caducifolia, lo cual aumenta su importancia en el verano (con su presencia y mayor desarrollo). Indudablemente, planificar los sitios eriazos internos de la ciudad, generando parques y áreas verdes con un predominio de estructuras arbóreas (idealmente de hoja perenne), reduciría los efectos de la ICU, tanto en intensidad como magnitud.

## Agradecimientos

La presente investigación pudo ser realizada gracias a que ha sido financiada por el fondo de Proyectos FAU de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, código 008/007. Se agradece al Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio del Departamento de Geografía de la misma universidad por el apoyo instrumental y científico entregado, principalmente al Doctor Hugo Romero Aravena.

## Bibliografía

- Alonso MS, Labajo JL and Fidalgo MR (2003): Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain. *Atmósfera* (2003):137-148.
- Arnfield J (2003): Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, 23:1-26.
- Bello V (1994): La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie geográfica*, 4:83-97. Universidad de Alcalá.
- Beral-Guyonnet I (1997): Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnaise: l'îlot de chaleur urbain. *Revue de Géographie de Lyon*, 72:263-266.
- Borough P, McDonnell R (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford.
- Cuadrat JM, Saz MA, Vicente-Serrano SM (2003): Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain). *Geophysical Research Abstracts*, 5:02592. European Geophysical Society.
- Cuadrat JM, Saz MA, Vicente-Serrano SM (2005): Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La Isla de Calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la A.G.E.*, 40:311-327.
- Eliasson I (1994): Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*, 15:1-22.
- Fernández F (1996): *Manual de climatología aplicada*. Editorial Síntesis S.A. Madrid, España.
- Fernández F, Montávez JP, González JF, Valero F (2004): La estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. En *El clima entre el mar y la montaña* (García Codron JC et al. , Eds.), Asociación Española de Climatología, A4:641-650.
- Gedzelman SD, Austin S, Cermak R, Stefano N, Partridge S, Quesenberry S and Robinson DA (2003): Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor. Appl. Climatol.*, 75:29-42.
- Guijarro JA (1998): Influencia de la urbanización en las series termométricas de Baleares. IV Reunión de Climatología: *El clima y el factor urbano*. Madrid, 27-28 Feb. 1998. pp.:305-314.
- Jáuregui E (1997): Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31:3821-3831.
- Jáuregui E (2005): Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera*, 18:247-252.
- Kim YH, Baik JJ (2002): Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 41:651-659.
- Klisyk K, Fortuniak K (1999): Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment*, 33:3885-3895.

- Kolokotroni M and Giridharan R (2008): Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82:986-998.
- Landsberg H (1981): *The Urban Climate*. Academic Press, New York.
- Liu W, Ji C, Zhong J, Jiang X, Zheng Z (2007): Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. *Theor. Appl. Climatol.*, 87:213-221.
- Lowry W (1977): Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 36:1377-1391.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU (2007): Análisis de tendencia de localización. Etapa I: Caso Rancagua-Machalí <[http://www.minvu.cl/incjs/download.asp?glb\\_cod\\_nodo=20070615105257&hdd\\_nom\\_archivo=1%BA%20informe%20Rancagua%2Epdf](http://www.minvu.cl/incjs/download.asp?glb_cod_nodo=20070615105257&hdd_nom_archivo=1%BA%20informe%20Rancagua%2Epdf)> [Consulta: 5 Agosto 2008].
- Montávez JP, Rodríguez A and Jiménez JI (2000): A study of the urban heat island of Granada. *Int. J. Climatol.*, 20:899-911.
- Moreno MC (1994): Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14:705-710.
- Oke TR (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 108:1-24.
- Oke TR (1987): *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.
- Oke TR (1995): The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *Wind Climate in Cities* (Cermak JE, ed), Kluwer-Academic Publ., Norwell.
- Rizwan A, Leung Y, Dennis L (2008): A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20:120-128.
- Romero H, Sarricolea P (2006): Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor de superficie. En *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*, (Cuadrat JM, Saz MA, Vicente SM, Lanjeri S, De Luis M, González-Hidalgo JC, eds.). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A, 5:827-837.
- Sarricolea P, Romero H (2006): Cambios de uso y coberturas del suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor urbana de superficie de Santiago. *Anales de la Sociedad chilena de ciencias geográficas*, (2006):207-210.
- Schmidlin T (1989): The urban heat island at Toledo, Ohio. *Ohio Journal of Science*, 89:38-41.
- Unwin D (1980): The synoptic climatology of Birmingham's heat island. *Weather*, 35:43-50.
- Yagüe C, Zurita E, Martínez A (1991): Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, 25B:327-332.
- Yamashita S, Sekine K, Shoda M, Yamashita K, Hara Y (1986): On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. *Atmospheric Environment*, 20:681-686.
- Yuan F, Bauer M (2007): Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106:375-386.