

IMPACTO DE LA EDIFICACIÓN EN EL CLIMA URBANO ARIDO

Mario Cúnsulo¹, Alberto Papparelli², Alejandra Kurbán², Eduardo Montilla³, Carlos Herrera⁴
Área Arquitectura Ambiental

Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) – Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)
Santa Fe 198 Oeste 1° Piso, J5400ZAA San Juan. Email: argamb@unsj.edu.ar. Tel (0264) 4202664

RESUMEN: Se presentan resultados parciales de un proyecto de investigación trianual que estudió el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el Gran San Juan analizando correlaciones entre los índices urbanísticos de Factor de Ocupación del Suelo y Densidad Volumétrica con las variaciones de temperatura y humedad relativa, desde el baricentro hacia la periferia urbana. Los sectores cardinales con **mayor superficie de ocupación** se corresponden con los de **menor diferencia de temperatura** entre centro y periferia; los sectores de **menor superficie de ocupación** se corresponden con los de **mayor diferencia de temperatura** entre centro y periferia. Respecto de la humedad relativa los sectores cardinales con **mayor superficie de ocupación** se corresponden con los de **menor diferencia de humedad relativa** entre centro y periferia; análogamente, los sectores de **menor superficie de ocupación** se corresponden con los de **mayor diferencia de humedad relativa** entre centro y periferia. Las diferencias higrótérmicas promedio entre el centro principal y su periferia urbana, son muy similares en invierno y verano, de lo cual se desprende que éstas son independientes de la estación climática.

Palabras Clave: densidad volumétrica, ocupación del territorio, clima urbano.

INTRODUCCIÓN

De todos los años con registros climáticos en el orden mundial, la última década de los '90 resultó la más calurosa con 0,6°C por sobre la temperatura de finales del siglo XIX, corroborado por estudios indirectos (Hadley Centre, 2000).

La percepción empírica de la diferencia climática entre la ciudad y el área no urbana circundante se ha demostrado científicamente en una gran cantidad de estudios sobre el tema. Este efecto es conocido como Isla de Calor de la ciudad (Mazzeo, N., 1984) (Papparelli A. *et al*, 1997, 1998), y es consecuencia de la actividad humana que modifica los principales parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa, balance de radiación, etc.). La actividad del hombre es también la principal causa del cambio climático global según estudios recientes (Hadley Centre, 2000).

En este marco, el presente trabajo analiza la correspondencia entre las variables climáticas de temperatura y humedad relativa (principales parámetros que intervienen en el diseño bioclimático tanto urbano como arquitectónico) registradas en el área urbana del Gran San Juan y los índices urbanísticos de Factor de Ocupación del Suelo y Densidad Volumétrica, principales indicadores de los grados de antropización del área de estudio.

MEDICIONES URBANAS DE TEMPERATURA y HUMEDAD RELATIVA EN PUNTO FIJO E ITINERANTES

Mediciones Itinerantes: se ejecutaron en los 48 Nodos Urbanos Muestra definidos en el Gran San Juan seleccionados con un método geométrico, urbanísticamente aleatorio (Papparelli, A., *et al*; 1994), sobre las 16 direcciones cardinales principales, cuyo centro se hace coincidir con la plaza principal de la ciudad (Plaza 25 de Mayo) y con el cual se hace la georeferenciación. El instrumental utilizado para las mediciones fueron 2 termohigrómetros digitales portátiles con un tiempo de respuesta máximo (o tiempo de estabilización de la lectura) de 5 segundos, los que se instalaron a 50cm sobre el vehículo, cubriendo el sensor del instrumento con un abrigo meteorológico de pequeñas dimensiones ($\phi=12\text{cm}$, altura =12cm). Las mediciones se realizaron en 7 días alternados con tres recorridos por día: 9:00hs, 15:00hs y 21:00hs tanto para invierno (del 15/06 al 15/08) como para verano (del 15/12 al 15/02). El Programa de Mediciones definió 2 recorridos simultáneos para 2 orientaciones perpendiculares entre sí, cada uno de los cuales era realizado por un vehículo. Se adicionaron 2 registros en los extremos de la periferia urbana correspondiente al cuarto de rumbo, uno al comienzo y otro al final de cada recorrido. Los recorridos se realizaron sobre transectas que atraviesan el ejido urbano asegurando la cobertura de toda la trama de la ciudad. (Ver Figura 1). Las mediciones fueron realizadas en días de cielo despejado, con un Índice de claridad $K_T \cong 0,7$. Los registros entre uno y otro Nodo Urbano correlativo, se realizaron con una diferencia de 5 minutos, totalizando cada recorrido 50 minutos en cada una de las transectas elegidas. En cada transecta se ejecutaron 11 registros con horario central a las 9:00hs; 15:00hs; y 21:00hs. Con esta metodología se obtiene una estadística de las dos estaciones climáticas más rigurosas.

Mediciones de Punto Fijo en Área Urbana: se realizaron por medio de una estación meteorológica digital localizada a una altura de 12,0m sobre el nivel del terreno natural, sin obstrucción edilicia cercana, lo que garantiza una buena exposición y captación de las condiciones atmosféricas del área urbana. Esta estación se verifica y contrasta periódicamente con un

¹ Profesional Principal CONICET, Profesor Nivel Medio UNSJ

² Profesor Titular UNSJ, Profesional Principal CONICET

³ Profesor JTP UNSJ

⁴ Profesor Adjunto UNSJ

psicrómetro instalado en un abrigo meteorológico en el mismo lugar donde se encuentra dicha estación. Se realizan registros de ambas variables con intervalos de 60 minutos, salvo los días de mediciones itinerantes en los que se programa para registrar con intervalos de 5 minutos a fin de realizar las correcciones horarias de las mediciones itinerantes.

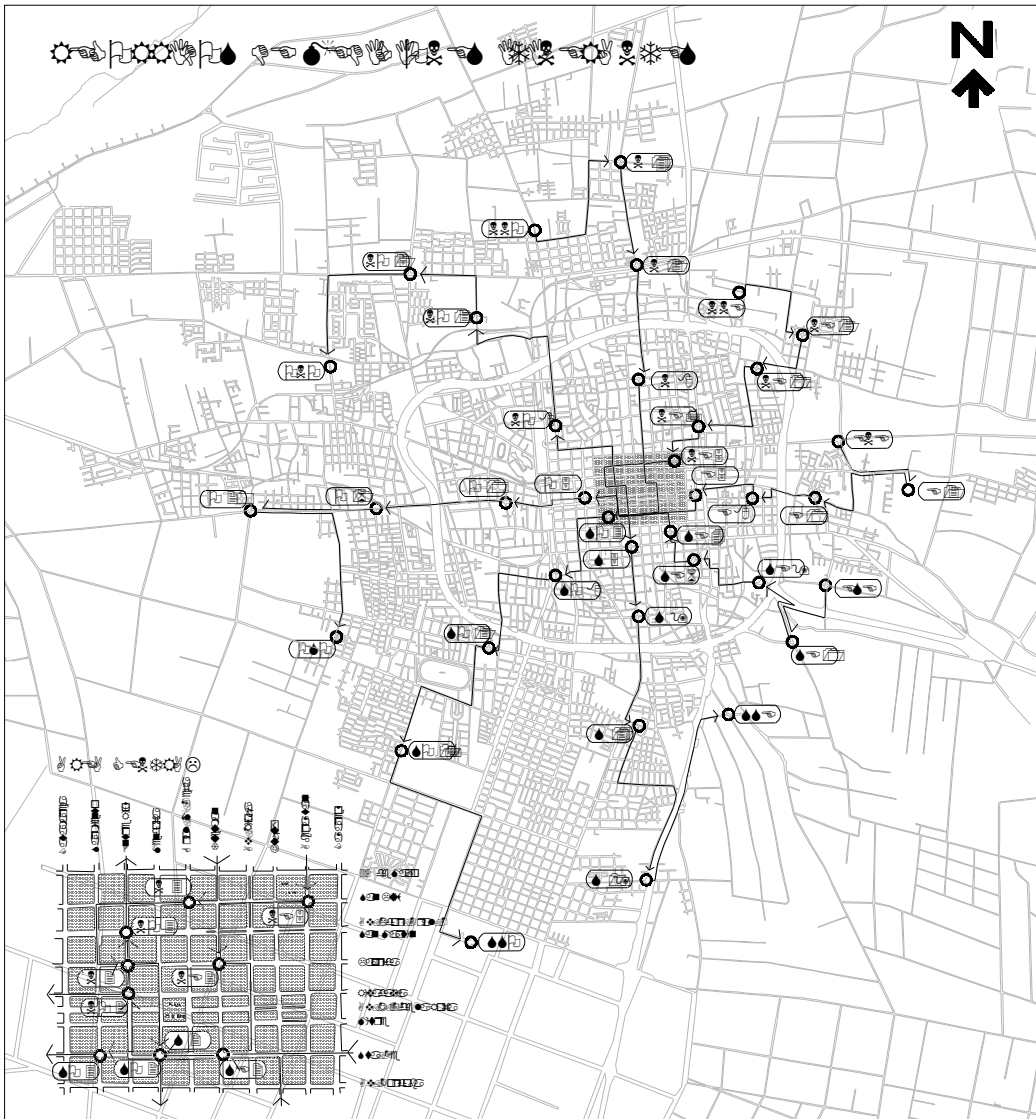


Figura 1: Gráfica de transectas de mediciones climáticas urbanas

CORRECCIÓN DE PERFIL VERTICAL DE LAS MEDICIONES CLIMÁTICAS EN PUNTO FIJO

Para hacer comparables los datos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa registrados en la estación meteorológica de punto fijo ubicada a 12,0m de altura sobre el nivel del terreno natural, con los datos obtenidos en las mediciones climáticas itinerantes tomados aproximadamente a 2,00m de altura sobre el nivel del terreno y en diversos puntos del ejido urbano, se ejecutó un estudio de perfiles verticales, metro a metro, de ambas variables, desde 0,0m a 15,0m. Esto permitió trasladar los valores registrados en la estación real, a una estación meteorológica simulada a 2,00m sobre el nivel del suelo.

CORRECCIONES HORARIAS E HISTÓRICAS

Debido a la diferencia temporal de 50 minutos que se produce entre el primero y el último registro de la medición climática itinerante, se realizaron correcciones horarias por medio de los valores de T°C y HR% registrados en la estación meteorológica de punto fijo urbano para los mismos días de medición. Se obtuvieron así valores representativos de los horarios centrales (horas exactas) en las mediciones de: 9:00hs, 15:00hs y 21:00hs. Con estos datos se ejecutaron curvas de ajuste logarítmico, utilizando un software que modelizó la nube de puntos presentada. Por medio de sus ecuaciones representativas se obtuvieron los valores de variación climática cada 5 minutos y se calcularon los Coeficientes de Corrección para referenciar la toma realizada en cada Nodo Urbano Muestra.

A fin de evitar posibles influencias circunstanciales de un año climáticamente atípico que pudieran producir alteraciones globales a las mediciones climáticas, los valores registrados en las mediciones itinerantes, se contrastaron con una estadística de 12 años (1993-2004), medida en la estación meteorológica de punto fijo urbano, obteniéndose un porcentaje de corrección que se aplicó a cada una de las tomas realizadas cada 5 minutos, luego de haber sido ajustadas con la corrección horaria. Esto permitió contar con una estadística climática en tiempo real.

MODELO DE VARIACION HIGROTÉRMICA ENTRE CENTRO URBANO Y PERIFERIA

Los valores climáticos obtenidos se procesaron mediante un software de modelización tridimensional o espacio-laminar que permitió ejecutar cortes horizontales, determinándose isóneas representativas de T°C y HR%. Estas isóneas, mostraron en general un comportamiento concéntrico a la ciudad y permitieron ejecutar cortes verticales al terreno coincidentes con cada uno de los 16 ejes cardinales, localizando en un extremo de éstos el centro principal de la ciudad y en el otro, su límite en la periferia urbana. De esa forma y por medio de un software de diseño asistido por computadora, se obtuvo un modelo direccional con puntos representativos para cada isónea respectiva, referenciándolos con las distancias desde el centro principal hasta el centro de cada Nodo Urbano Muestra.

Las ecuaciones de las curvas logarítmicas de ajuste espacial de la T°C y HR% para invierno y verano, permitieron calcular los valores de los 239 Nodos Urbanos representativos de todo el ejido urbano analizado, para las 16 orientaciones cardinales respectivas. Estos valores se modelizaron en transectos coincidentes con las mediciones itinerantes para dichas direcciones cardinales estudiadas, calculándose las diferencias de cada variable entre baricentro y periferia. En las Figuras 2a, 2b, 2c, 2d se presentan, a modo de ejemplo, los perfiles espaciales de temperatura y humedad relativa de invierno y verano, para las orientaciones Norte y Sur.

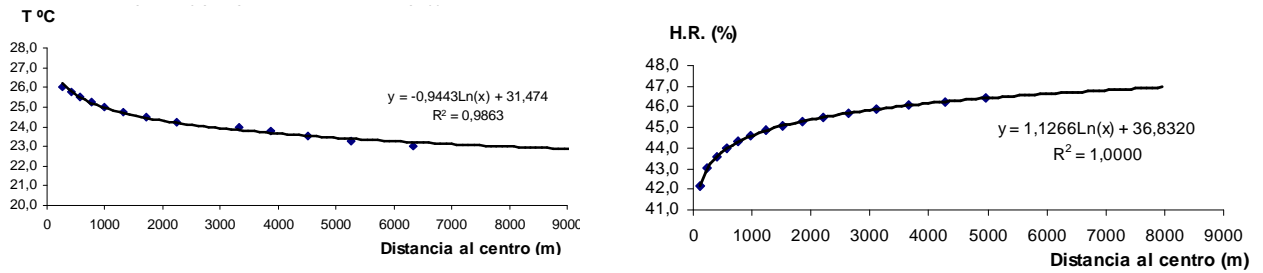


Figura 2a: Modelización espacial, de T°C y HR%,.Orientación Norte - Verano Año 2005

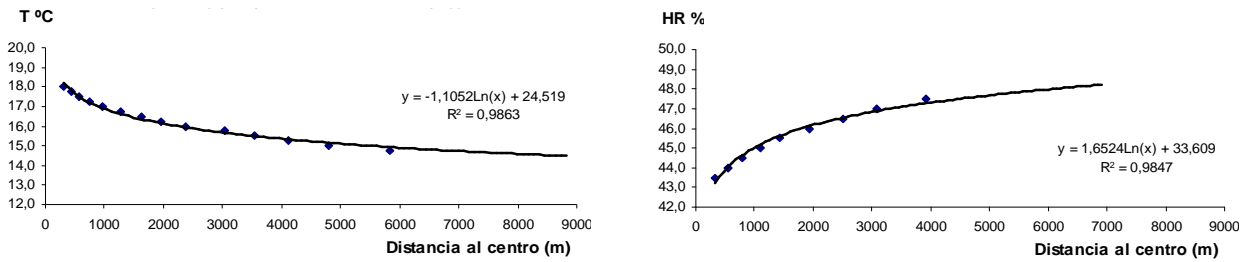


Figura 2b: Modelización espacial, de T°C y HR%,.Orientación Norte - Invierno Año 2005

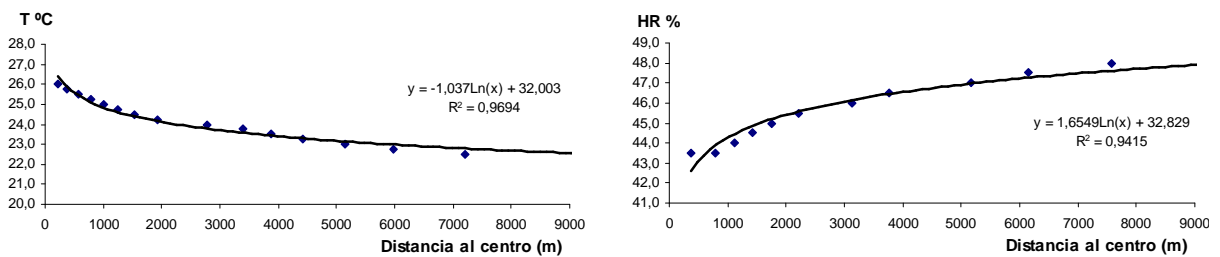


Figura 2c: Modelización espacial, de T°C y HR%,.Orientación Sur - Verano Año 2005

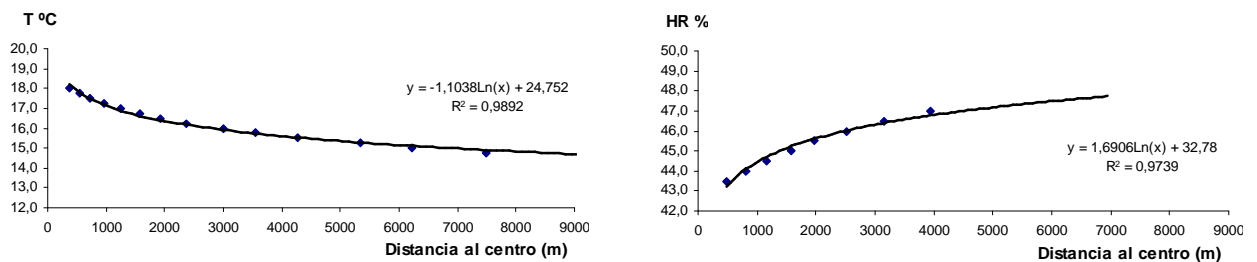


Figura 2d: Modelización espacial, de T°C y HR%,.Orientación Sur - Invierno Año 2005

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CIUDAD Y SUS INDICES URBANISTICOS

El relevamiento urbano del Gran San Juan del año 2000 (Papparelli, A. *et al*, 2001) fue actualizado para el año 2005 con fotografías aéreas, realizadas por integrantes del Área Arquitectura Ambiental, con un vuelo a 2.500m de altura, en un avión Tipo Ranquel IA-46 propiedad del Aeroclub San Juan. Con software de diseño asistido por computadora, se actualizó cada Nodo muestra superponiendo las planchetas catastrales con dichas fotografías digitales, verificándose luego las alturas de edificación con relevamientos *in situ*. Se calcularon entonces dos índices urbanísticos: *Factor de Ocupación del Suelo (FOS)* y *Densidad Volumétrica (DV)*, necesarios para determinar la correlación entre la edificación y las variables climáticas estudiadas. La superficie total relevada por medio de los 239 Nodos Urbanos Muestra, representa para el año 2005 el 13,5% de la superficie total de la trama urbana estudiada del Gran San Juan (88.977.680,00m²), lo que asegura que el muestreo sea estadísticamente confiable.

Los valores de FOS y DV de cada Nodo Urbano Muestra se procesaron obteniéndose un modelo tridimensional desde el centro a la periferia urbana, a los cuales se les realizó cortes horizontales, obteniéndose isolíneas de ambos índices para el área de estudio. Las isolíneas de FOS permitieron definir el límite urbano actualizado el que se corresponde con la isolínea de FOS = 5%, la cual fue regularizada mediante relevamientos de campo para incorporar las áreas de características urbanas que el modelo tridimensional dejaba fuera y a la vez segregando aquellas zonas que por sus características de ocupación no pueden considerarse urbanas y el modelo incorporaba dentro de la isolínea del 5%. Posteriormente este límite urbano fue regularizado a la trama urbana del Gran San Juan. A partir de estas isolíneas se obtuvieron modelos direccionales que permitieron conocer la variación de ambos índices urbanísticos para todo el ejido del Gran San Juan. Se calcularon las diferencias ΔFOS y ΔDV existentes entre los valores de cada Nodo Urbano y el de su respectiva periferia urbana, para cada orientación cardinal. De esa manera, se estableció el modelo de variación del comportamiento espacial de ambos índices en toda su extensión, para las 16 orientaciones cardinales. En la Figura 3a y 3b, como ejemplo se presentan los perfiles espaciales correspondientes a las orientaciones Norte y Sur.

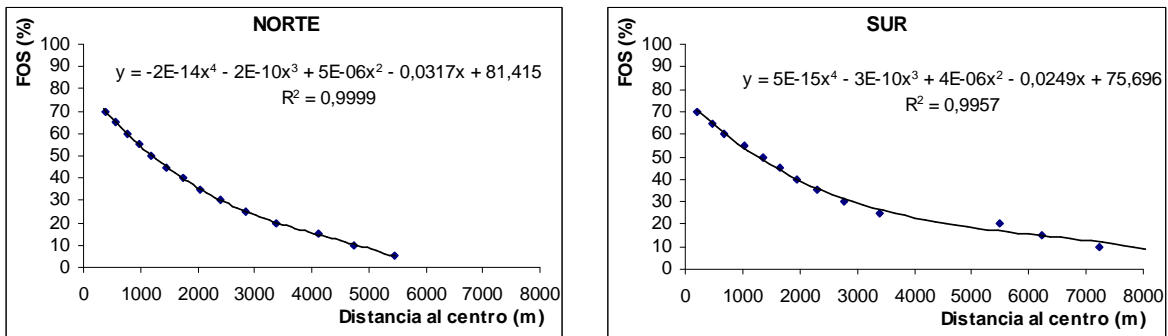


Figura 3a: Modelización espacial de FOS centro-periferia, orientaciones Norte y Sur año 2005

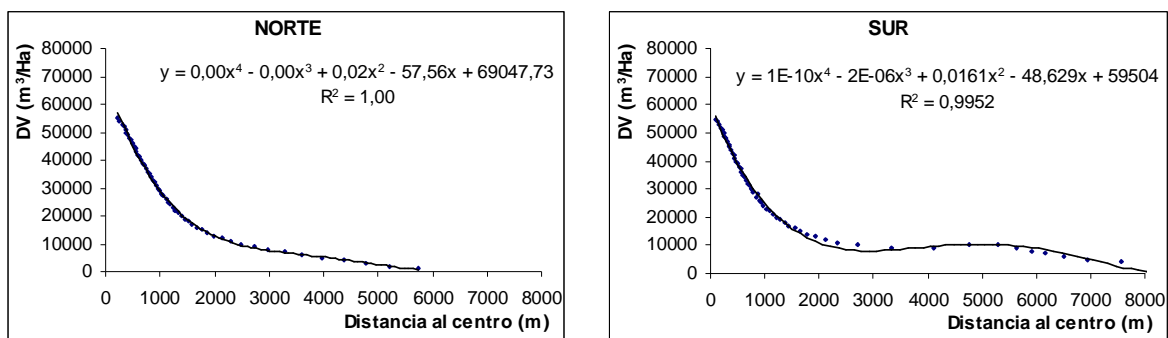


Figura 3b: Modelización espacial de DV centro-periferia, orientaciones Norte y Sur año 2005

RESULTADOS

La variación espacial de temperatura y humedad relativa en Invierno y Verano desde el baricentro hacia la periferia urbana para cada sector cardinal, ordenada en orden decreciente se muestra en la *Tabla I*.

Analizando la superficie de ocupación de la ciudad por sectores cardinales y el comportamiento de las variables climáticas de T°C y HR% tanto para invierno como para verano, se observa una estrecha relación entre ambos: los sectores de mayor ocupación del suelo urbano son: Noroeste, Oeste, Suroeste y Sur, presentando tanto en invierno como en verano la menor diferencia de temperatura, lo que significa que éstos se comportan como los más cálidos de todo el asentamiento. En forma coincidente con la correlación mencionada, la humedad relativa presenta el comportamiento más seco de toda la trama urbana. Por el contrario, los sectores de menor ocupación del suelo urbano: Noreste, Este y Sureste, presentan la mayor diferencia de temperatura, lo cual indica que éstos se comportan como los más frescos del asentamiento. Coincidentemente,

estos mismos sectores presentan las mayores diferencias de humedad relativa, resultando los más húmedos de la trama urbana.

Verano

Sectores	$\Delta T^{\circ}C$
Este	+ 5,6
Noreste	+ 4,9
Sureste	+ 4,7
Sur	+ 4,6
Suroeste	+ 4,5
Noroeste	+ 4,5
Oeste	+ 4,3
Norte	+ 3,7
Promedio	+ 4,6

Sectores	$\Delta HR\%$
Sur	- 7,3
Este	- 7,1
Sureste	- 6,6
Noreste	- 6,0
Noroeste	- 6,0
Suroeste	- 5,3
Oeste	- 5,0
Norte	- 4,4
Promedio	- 6,0

Invierno

Sectores	$\Delta T^{\circ}C$
Este	+ 5,6
Noreste	+ 5,3
Sureste	+ 5,3
Sur	+ 4,9
Norte	+ 4,3
Oeste	+ 4,3
Suroeste	+ 4,2
Noroeste	+ 3,9
Promedio	+ 4,7

Sectores	$\Delta HR\%$
Sur	- 7,5
Sureste	- 7,4
Este	- 7,1
Norte	- 6,5
Noreste	- 6,0
Suroeste	- 5,2
Oeste	- 5,2
Noroeste	- 4,3
Promedio	- 6,2

Tabla 1: Variación de temperatura ($T^{\circ}C$) y humedad relativa ($HR\%$) por sectores cardinales

La Figura 4 muestra gráficamente estos resultados, superponiendo los comportamientos climáticos con la modalidad de ocupación del territorio por sectores cardinales. A fin de evitar una exagerada variedad de situaciones en la relación entre variables climáticas y urbanísticas, sólo se tuvieron en cuenta los ocho sectores cardinales principales (rumbos y medios rumbos).

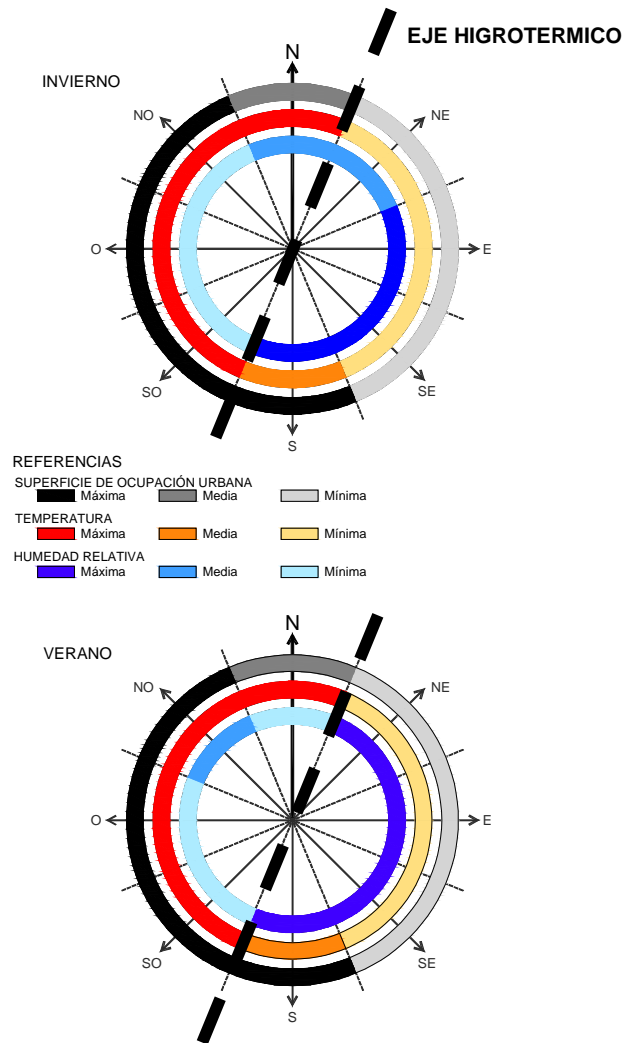


Figura 4: Correlación gráfica entre la ocupación del suelo y el comportamiento higrotérmico

Analizando las variaciones espaciales de temperatura, desde el centro principal hacia la periferia urbana, se observa que éstas presentan curvas con modelos similares a las de FOS y DV para todas las direcciones cardinales, mientras que las variaciones

espaciales correspondientes a la humedad relativa, presentan curvas con modelos inversos a los índices urbanísticos mencionados.

Para el caso de las temperaturas, el modelo de comportamiento es siempre **decreciente**, con curvatura decreciente, acompañando al de los índices urbanísticos mencionados; en el caso de la humedad relativa, el modelo de comportamiento es exactamente a la inversa, o sea **creciente**, con curvatura decreciente.

Las diferencias de temperatura y humedad relativa entre centro y periferia ($\Delta T^{\circ}\text{C}$ y $\Delta \text{HR}\%$) se correlacionaron matemáticamente con los valores diferenciales de índices urbanísticos (ΔFOS y ΔDV) tanto para invierno como para verano, para las 16 orientaciones cardinales. Las representaciones gráficas de dichas correlaciones se presentan en las *Figuras 5*.

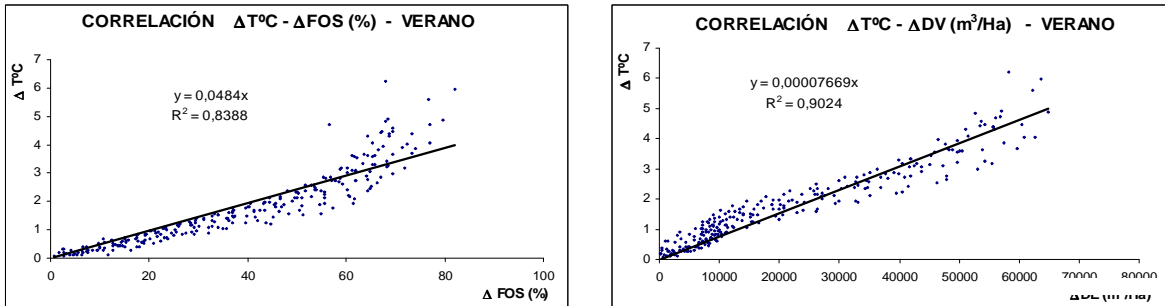


Figura 5a: Correlaciones Temperatura-FOS y Temperatura-DV para verano

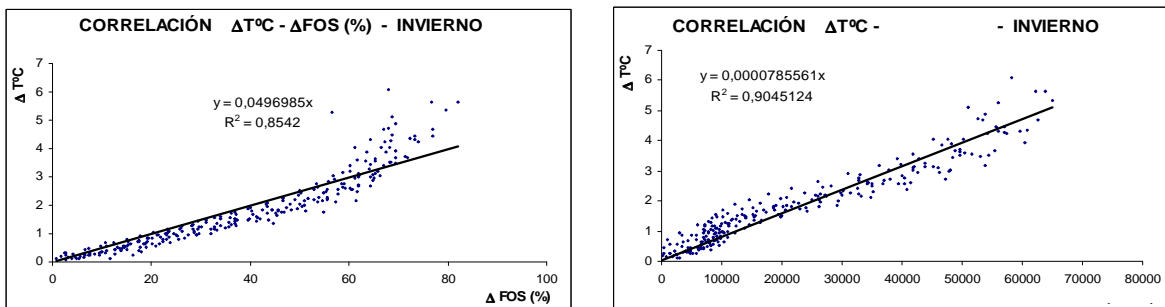


Figura 5b: Correlaciones Temperatura-FOS y Temperatura-DV para invierno

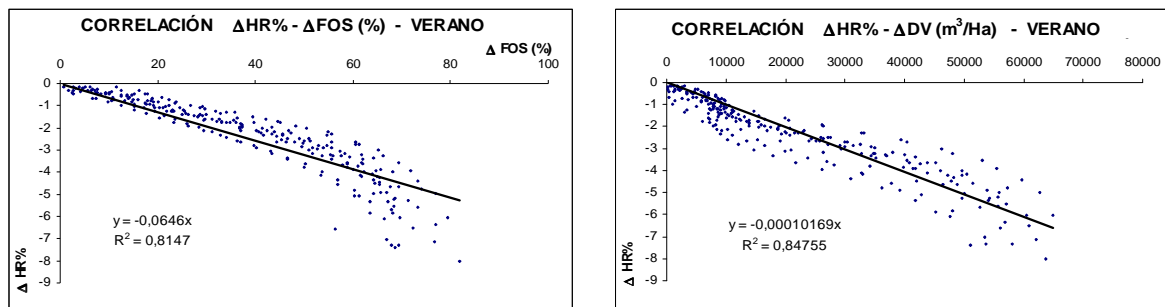


Figura 5c: Correlaciones Humedad Relativa-FOS y Humedad Relativa-DV para verano

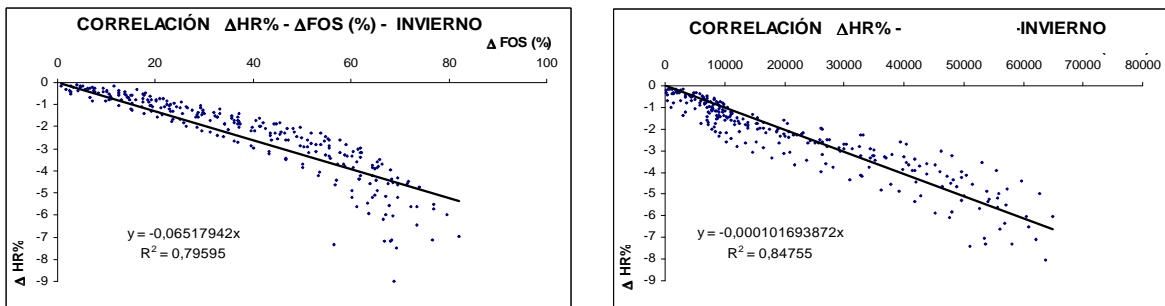


Figura 5d: Correlaciones Humedad Relativa-FOS y Humedad Relativa-DV para invierno

CONCLUSIONES

Los sectores cardinales con mayor superficie de ocupación se corresponden con los de menor $\Delta T^{\circ}\text{C}_{\text{urb-no urb}}$, siendo los más cálidos; los sectores de menor superficie de ocupación se corresponden con los de mayor $\Delta T^{\circ}\text{C}_{\text{urb-no urb}}$, resultando más frescos. Respecto a la humedad relativa los sectores cardinales con mayor superficie de ocupación se corresponden con los de menor $\Delta\text{HR}\%_{\text{urb-no urb}}$, por tanto las zonas son más secas; por su parte, los sectores de menor superficie de ocupación se corresponden con los de mayor $\Delta\text{HR}\%_{\text{urb-no urb}}$, resultando más húmedos.

Las diferencias de temperatura y humedad relativa promedio entre centro principal y periferia urbana, son muy similares en invierno y en verano: $\Delta T^{\circ}\text{C} = + 4,7^{\circ}\text{C}$, $\Delta\text{HR}\% = - 6,2\%$; $\Delta T^{\circ}\text{C} = + 4,6^{\circ}\text{C}$, $\Delta\text{HR}\% = - 6,0\%$ respectivamente. Esto significa que las diferencias higrotérmicas se producen independientemente de la estación climática de que se trate.

Se observa una coincidencia estacional en las orientaciones donde se han producido las *mínimas* variaciones entre centro principal y la periferia urbana, tanto de temperatura como de humedad relativa. Para verano dicha coincidencia se verifica en la orientación NORTE y para invierno en la NOROESTE.

En relación a las *máximas* diferencias las coincidencias estacionales no se verifican en una misma orientación, pero sí en un mismo sector cardinal. En verano e invierno dicha coincidencia se manifiesta para la temperatura en el sector ESTE-SURESTE. En el caso de la humedad relativa, la coincidencia se verifica en el sector ESTE: invierno en la orientación SUR-SURESTE y verano en el sector ESTE-NORESTE.

Analizando las nubes de puntos presentadas en las relaciones entre las variaciones de temperatura y humedad relativa, para invierno y verano, conjuntamente con las variaciones de los índices urbanísticos: Factor de Ocupación del Suelo y de Densidad Volumétrica, se infiere la existencia de una clara y marcada influencia de los incrementos de los valores urbanísticos en la modificación de dichas variables climáticas, verificando que el *índice de correlación* (R^2) supera el 80,0% en todos los casos, para ambas estaciones del año.

De las ecuaciones de las rectas de correlación puede inferirse que un incremento del FOS en un valor de 10,0%, producirá un aumento de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ en la temperatura y una disminución de 0,65% en la humedad relativa. Para un incremento de la DV, de $10.000\text{m}^3/\text{Ha}$, la temperatura aumentará en promedio $0,8^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa disminuirá en un valor de 1,0%.

REFERENCIAS

- Hadley Centre (2000) Climate Change: An update of recent research from the Hadley Centre. Londres
- Mazzeo, N. (1984) Aplicaciones del Diagnóstico Climático a problemas relacionados con el urbanismo. Fac. de Ciencias Exactas y Naturales. UBA.
- Papparelli, A.; Kurbán, A.; Cúnsulo, M. (1994): "Características de la distribución espacial en la ciudad de San Juan". Edit. Facultad de Arquitectura. U.N.S.J.
- Papparelli, A.; Kurbán, A.; Cúnsulo, M.; Montilla, E.; Herrera, C. (1997) Variación Higrotérmica entre Area Urbana y No Urbana en una Zona Arida: Ciudad de San Juan. (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente). Revista nacional con referato de ASADES (Asociación Argentina de Energía Solar) Volumen 1, 225 - 228.
- Papparelli A., Kurbán A., Cúnsulo M., Montilla E. (1998). Interdependencia entre Isotermas e isohumas con la Modalidad de la Estructura Urbana. *Avances en energías renovables y Medio Ambiente* Vol, 2 11.17-11.20
- Papparelli, A., Kurbán A., Cúnsulo M., (2001), Características de la Distribución Espacial de la Ciudad de San Juan. 2^{da} Edición: 1 Vol. 100 Ejemplares - Edit. G.M.A. (FAUD-UNSJ).
- Papparelli A., Kurbán A., Cúnsulo M., *et al* (1999 - 2000 - 2001- 2002 - 2003 - 2004 - 2005). Estadística Climática Diaria Hora a Hora Ciudad de San Juan. *PROPAC, Programa de Actualización Climático-urbanística*. FAUD - UNSJ.

ABSTRACT: Partial results of a 3-year research project studying the performance of the temperature and the relative humidity in the Great San Juan analyzing correlations between the urban index: Land Occupation Factor and Volumetric Density with the temperature ($T^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (RH%) variations from the center toward the urban periphery, are presented. The cardinal sectors with higher occupation area, belong with those of smaller urban-non urban temperature difference ($\Delta T^{\circ}\text{C}$); the sectors with smaller occupation area, belong with those of higher urban non-urban temperature difference ($\Delta T^{\circ}\text{C}$). Regarding the relative humidity the cardinal sectors with higher occupation area, belong with those of smaller urban non-urban relative humidity difference ($\Delta\text{RH}\%$); similarly, the sectors with smaller occupation area belong with those of higher urban non-urban relative humidity difference ($\Delta\text{RH}\%$). The average hygrothermal differences between the main center and its urban periphery, are very similar in winter and summer, indicating that they are independent of the climatic season.

Keywords: building density, land occupation, urban climate.