

UTILIZACIÓN DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA EVALUAR EN EL TIEMPO EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SECTOR EDIFICIO URBANO DE ALTA DENSIDAD. CASO: ÁREA METROPOLITANA DE MENDOZA.

Arboit, Mariela¹ Diblasi, Angela² y de Rosa, Carlos³

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda. Instituto de Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (INCIHUSA).

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. 0261-5244054 –E-mail: marboit@lab.cricyt.edu.ar

Recibido: 10/08/12; Aceptado: 03/10/12

Resumen. La factibilidad técnica del aprovechamiento del abundante recurso solar en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), mediante estrategias de calefacción solar pasiva y calentamiento solar de agua, ha sido demostrada en experiencias previas. En entornos urbanos de alta densidad el empleo de sistemas solares pasivos y medidas adicionales de conservación posibilitaría reducir los consumos energéticos invernales con aportes de energías renovables para el acondicionamiento ambiental del parque edilicio urbano, permitiendo ahorros sustanciales en el consumo energético. En este sentido las medidas de protección del acceso al sol en los códigos urbanos y las propuestas de normativas municipales para la implementación progresiva de las estrategias son fundamentales. El trabajo presenta una metodología estadística que permite evaluar comparativamente dos propuestas normativas de reformas al Código Urbano y de Edificación de la ciudad de Mendoza (Argentina) con el fin de determinar estrategias de desarrollo urbano presente y futuro a partir del análisis de las consecuencias energético-ambientales de la implementación de dichas reformas, en función de sus características morfológicas y del recurso solar disponible. En una etapa previa se ha evaluado la reducción del acceso al sol comparando la situación de referencia (actual, sin cambios) respecto a su evolución previsible futura a mediano (30 años) y largo plazo (60 años) resultantes de la nueva propuesta del municipio (PM) y de la propuesta alternativa (PA) desarrollada por la UID (INCIHUSA-CONICET).

En una segunda etapa se ha desarrollado una metodología estadística para el análisis de ambas propuestas, que permite determinar el peso de cada variable morfológica urbano-edilicia, sobre el Factor de Asoleamiento Volumétrico (FAV), proponiendo además una ecuación sencilla que permite calcular el valor del indicador, lo que constituye el aporte sustancial de este trabajo.

Los resultados obtenidos indican que de implementarse la propuesta municipal (PM) la reducción de la energía solar disponible por unidad de volumen construido sería: 26,26 % a mediano plazo y 32,53% a largo plazo, comparada con la propuesta alternativa (PA) con lo que se concluye que existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAV a mediano y largo plazo cuando se aplica la PM y cuando se aplica la PA.

Palabras clave: Desarrollo urbano sostenible, morfología urbana, potencial solar

1. INTRODUCCIÓN

En el momento actual los problemas debidos al crecimiento de la población mundial y en particular, las crecientes tasas de urbanización, especialmente en los países en desarrollo, están determinando una tendencia claramente insostenible. (Meadows D.H, et al 2004) Otros problemas de máxima gravedad están complementando la condición no sostenible del crecimiento actual: el agotamiento de los recursos naturales no renovables, (entre ellos los energéticos fósiles), la emisión de desechos contaminantes que ya ha superado la capacidad portante del soporte ecológico global y la creciente brecha entre los países ricos del hemisferio norte y los pobres del hemisferio sur.

En Argentina hoy los combustibles fósiles proveen el 89,4% de la energía consumida, mientras que el resto de las fuentes comparten el 10,6% restante (AIE, 2009). Las centrales termoeléctricas abastecidas principalmente por gas natural y en menor medida por gas-oil y, fuel-oil, representan el 60% de la generación de energía eléctrica, mientras que las hidroeléctricas y nucleares lo hacen con el 31% y 9% respectivamente. Los yacimientos actualmente en explotación son los mismos descubiertos hasta 2002 por lo que, cualquier faltante en disponibilidad de petróleo o gas natural provocará una crisis energética ya que no se dispone de otra fuente para sustituirlo. Argentina dispone actualmente del 0,3% de las reservas de petróleo del mundo, del 0,4% de las de gas natural y del 0,3% de las de carbón mineral.

Planteada así la cuestión, la propuesta de reforma al código edilicio de la ciudad de Mendoza constituye una oportunidad para implementar las estrategias que faciliten el camino hacia la sostenibilidad territorial futura. La revisión de los modelos precedentes que guiaron el desarrollo urbano, el conocimiento disponible para una evaluación más precisa y las demandas sociales explícitas para la construcción de una ciudad más inclusiva y equitativa, constituyen el marco de los desafíos a los que la nueva propuesta normativa debería dar respuesta. Sin embargo del análisis se desprende que la nueva normativa distaría bastante de acercarse al paradigma de ciudad compacta lo cual resultaría clave para un desarrollo más sostenible de un conglomerado urbano en el contexto regional de las tierras secas.

¹ Investigador Asistente CONICET

² Profesional Principal CONICET

³ Investigador Principal CONICET

2. SITUACIÓN DE REFERENCIA

El estudio toma como universo de análisis la Ciudad de Mendoza que se asienta sobre el borde oeste del oasis norte de la provincia homónima. Sus coordenadas geográficas son: latitud -32.85 , longitud 63.85 y altitud 870 msnm.

Los datos climáticos principales son: i. horas anuales: en confort $21,5\%$, calefacción necesaria $70,00\%$, enfriamiento necesario $8,5\%$, ii. grados-día anuales: calefacción (B18) 1384 , enfriamiento (B23) 163 , III. Radiación solar global media anual: $18,06$ MJ/m² día.

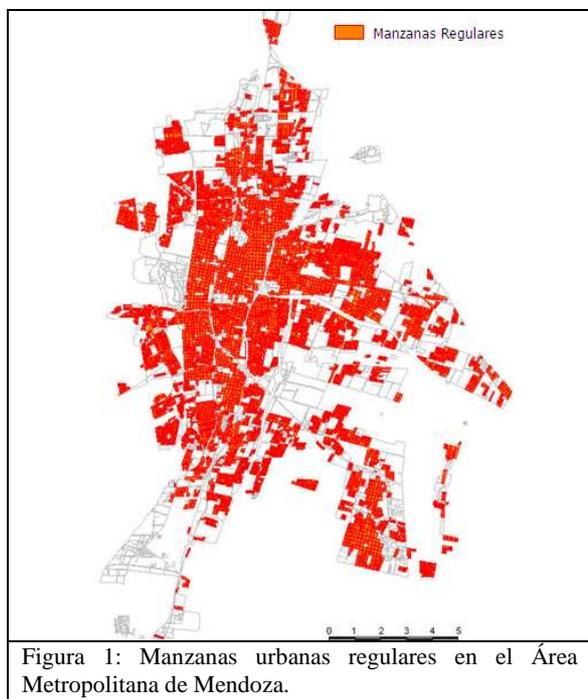


Figura 1: Manzanas urbanas regulares en el Área Metropolitana de Mendoza.



3. METODOLOGIA. TRABAJO PREVIO:

Si bien el desarrollo metodológico previo ha sido ya informado (Arboit, et. al. 2010), se estima necesario presentar aquí una síntesis del mismo con el fin de facilitar la comprensión de los resultados que se presentan por primera vez en este trabajo.

Los pasos metodológicos previos de la investigación han sido:

1. Evaluación del acceso al sol, en la situación de referencia (actual sin cambios) para entornos urbanos de alta y baja densidad (se han estudiado 43 manzanas urbanas del AMM de traza en cuadrícula de baja densidad) y 70 casos para el estudio actual de alta densidad (Arboit et al. 2008 y Arboit et al. 2012). Se cuenta además con datos previos de 36 manzanas (baja, media y alta densidad) (Basso et al., 2001).
2. Evolución del potencial solar para calefacción de espacios y calentamiento de agua para la máxima densificación del tejido urbano en entornos de alta densidad, aplicando las prescripciones de dos propuestas de modificación al código de edificación: propuesta municipal (PM) y propuesta alternativa (PA).
3. Determinación de enmascaramiento (sólido y permeable) para la situación de referencia en entornos de alta densidad.
4. Determinación del Indicador: Factores de Asoleamiento Volumétrico (FAV). El indicador expresa la relación entre morfología urbana y acceso al recurso solar.
5. Determinación de los impactos ambientales debidos a la implementación de la nueva propuesta normativa.
6. Estudio del potencial de ahorros de energía obtenibles mediante la implementación de las dos normativas: propuesta municipal y propuesta alternativa, para distintas morfologías edilicias del medio urbano.
7. Elaboración de una propuesta normativa municipal (PA) para la implementación progresiva de las estrategias estudiadas en el proyecto y su impacto energético- ambiental a mediano y largo plazo.

Se espera completar el estudio de las medidas de protección del acceso al sol implementadas en los códigos urbanos y el estudio de las estrategias legales, para proteger el acceso al sol en construcciones urbanas.

El estudio que se presenta se desarrolla a partir del indicador relevante propuesto FAV y los resultados de su análisis estadístico, para determinar la incidencia de las nuevas propuestas de modificación del Código Urbano y de Edificación de la Ciudad de Mendoza. A la situación considerada como representativa de la media actual, se realizaron cambios para evaluar mediante simulación la evolución a mediano y largo plazo de las dos alternativas. La información de base utilizada está formada por cada una de las variables (indicadores urbanos de asoleamiento y volumetrías climatizadas) que fueron calculadas para cada manzana y cada alternativa mediante el modelo gráfico-computacional, posteriormente utilizadas en un Modelo Estadístico. Este modelo permitió determinar las variables significativas que tienen mayor incidencia sobre la eficiencia energética de los edificios urbanos y comparar las diferentes alternativas.

Se presentan a continuación los resultados del estudio comparativo para las manzanas seleccionadas de alta densidad edilicia, corridas con un modelo de cálculo gráfico- computacional (Mesa, et. al. 2000).

Del total de 70 casos de estudio se presentan a continuación los valores medios y extremos.

Tabla 1: Manzanas urbanas. Valores medios y extremos.

Unidad N°	TiePMo*	VARIABLES EXPLICATIVAS										VARIABLES RESPUESTA		
		MORFOLOGÍA URBANA Y EDILICIA										FAVfn.	FAVt.	FAVTotal
		Ancho de Canal Vial	Retiros	ARBOLADO			Morf. Edilicia**	FOS	FOT					
Mag	Perm**	CoPM	FOS	FOT	FAVfn.	FAVt.	FAVTotal							
11	2	20.05	1/5	0	1	0	5	0.57	3.51	0.55	0.50	1.05		
13	4	20.05	1/5	0	1	0	12	0.59	2.67	0.58	0.79	1.37		
16	5	20.05	1/3	0	1	0	12	0.59	2.63	0.76	0.80	1.57		
20	2	8.06	1/7	0	1	0	7	0.35	4.13	0.24	0.33	0.57		
21	3	8.06	1/7	0	1	0	7	0.30	7.21	0.18	0.18	0.35		
25	1	29.92	0	2	3	83	1	0.31	0.70	0.33	1.44	1.77		
30	5	29.92	1/6	0	1	0	14	0.50	2.98	0.47	0.69	1.16		
36	4	18.23	1/6	0	1	0	14	0.54	1.64	0.55	1.22	1.77		
41	2	16.45	1/7	0	1	0	2	0.70	1.92	0.42	1.24	1.65		
42	3	16.45	1/7	0	1	0	2	0.71	4.65	0.34	0.38	0.71		
43	4	16.45	1/7	0	1	0	12	0.70	1.72	0.52	1.67	2.19		
47	1	19.81	0	1	2	97	1	0.46	1.91	0.36	0.67	1.03		
52	1	9.58	0	0	1	0	1	0.65	0.79	1.20	3.38	4.58		
57	4	9.58	1/7	0	1	0	13	0.72	4.42	0.44	0.44	0.87		
58	5	9.58	1/7	0	1	0	13	0.30	4.20	0.32	0.30	0.63		
70	3	16.95	1/6	0	1	0	10	0.52	2.96	0.50	0.53	1.04		

*Tiempo*propuesta: 1=Situación actual sin cambios (Situac.Actual); 2= Propuesta Municipal a Mediano Plazo(PM Med.P);3= Propuesta Municipal a Largo Plazo (PM Largo.P);4= Propuesta Alternativa a Mediano Plazo(PA Med.P);5= Propuesta Alternativa a Largo Plazo (PA Largo.P)
 ** Morf. Edilic: (1-14): comprende la altura edilicia y el índice de homogeneidad: diferencia entre los edificios altos y bajos.
 ***Permeabilidad del arbolado a la radiación solar : 1 =100; 2=24,09; 3 =36,21; 4 =27,47; 5 =46,23; 6=47,26; 7=26,42

Variabes urbanas y edilicias: Forma y Orientación de las manzanas * (no ha sido considerada en el presente estudio ya que todas las unidades de análisis comparten la misma disposición angular en el tejido urbano regular; Ancho de los canales viales (distancia entre las líneas de la construcción) valores típicos: 13.00, 16.00, 20.00 y 30.00 m); Retiros de torres (SB): está en función del ancho de calle y de la altura edilicia, se definen retiros frontales, laterales y posteriores- (m. o 1/altura edilicia); Estructura del Arbolado Urbano: magnitud (en función de las dimensiones del fenotipo -entre 1ra y 5ta magnitud-) , permeabilidad (permeabilidad estacional medida localmente como porcentaje) y completamiento (número real sobre el número máximo de árboles alrededor de la manzana urbana como porcentaje); Morfología edilicia: está representada por 14 tipos que consideran situaciones: homogéneas, heterogéneas, compactas y abiertas (combinadas) presentes en la morfología actual y su combinación con la altura edilicia. Factor de Ocupación del Suelo (FOS): es la relación entre el área de un edificio construida en planta baja y la superficie total construable del terreno. Factor de Ocupación Total (FOT): es la relación entre el área total construida de un edificio y la superficie total construable del terreno. (Tabla 1)

Factor de Asoleamiento Volumétrico (FAV): Expresa la relación entre la energía total neta incidente sobre superficies verticales al norte (+/- 15°), no enmascaradas, durante un ciclo anual de calefacción y el volumen total de los espacios a calefaccionar. El indicador es posiblemente el que mejor describe el potencial solar para calefacción de espacios mediante sistemas solares pasivos, en particular, la Ganancia Directa, en MJ/m2 año. Se estudia por separado FAVfn (fachadas norte) y FATt (techos).

El análisis comparativo nos permite contrastar el comportamiento de la variable FAV en las diferentes situaciones (actual, PM y PA en el mediano y el largo plazo). De él resulta que existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAV a mediano y largo plazo cuando se aplica la propuesta municipal y cuando se aplica la propuesta alternativa.

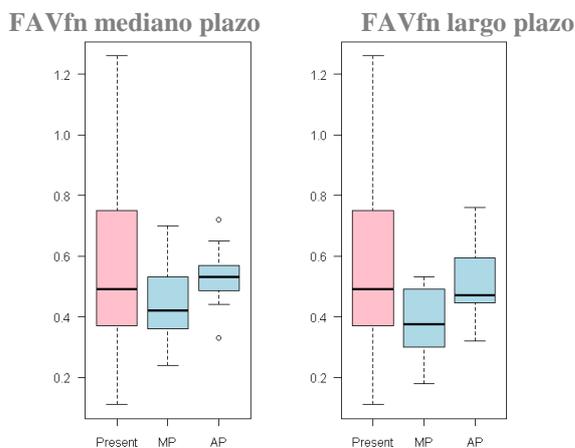


Figura 2 y 3: FAVfn a mediano y largo plazo. Situación Actual, Propuesta Municipal, Propuesta Alternativa

4. METODOLOGÍA – TRABAJO ACTUAL

Vista la cantidad y complejidad, de las variables, de sus interrelaciones y diferentes niveles de incidencia intervinientes en la definición del potencial energético, de edificios en entornos urbanos de alta densidad, se decidió recurrir al Análisis Estadístico a partir de un **Modelo Lineal con un Factor** con el fin de determinar el nivel de incidencia de las variables morfológicas (variables explicativas) sobre el indicador energético (variable respuesta: FAV), y poder descartar aquellas variables de mínimo impacto. Paralelamente, se obtiene para el indicador de ambas propuestas PM y PA y para cada tiempo (mediano y largo plazo), una ecuación sencilla que permite calcular el valor del mismo, evitando la pesada tarea de determinación del asoleamiento real mediante las 60 corridas del modelo gráfico-computacional por cada caso de estudio. Se elaboró un **Modelo Lineal con un Factor** para cada uno de los momentos estudiados (Situac. Actual, PM Med. P, PM Largo. P, PA Med. P, PA Largo. P). El trabajo presenta resultados y conclusiones para dichos indicadores: Factor de Asoleamiento Volumétrico (FAV) para muros norte y techos.

Los pasos metodológicos para construir el modelo lineal con un factor fueron los siguientes:

- Ajuste de un modelo lineal con un factor (**tiempo*propuesta=** Situac. Actual, PM Med. P, PM Largo. P, PA Med. P, PA Largo. P), y variables explicativas (Ancho de Calles, Retiros, Arbolado: magnitud, permeabilidad y completamiento, Morfología Edilicia, FOS y FOT,) para cada versión del indicador FAV: FAVfn y FAVt como variable de la respuesta.

- Comprobación de los supuestos del modelo: al analizar los supuestos del modelo a través del análisis de residuos y de pruebas estadísticas correspondientes. La prueba de Bruschi-Pagan para la comprobación de la homoscedasticidad arrojó p-valores de 0.002136 para el modelo FAVfn como variable de la respuesta, y p-valor de 0.01415 para FAVt. Los resultados de los valores de homoscedasticidad condujeron a la necesidad de un nuevo modelo. (Tabla 2 y 6)
- Aplicación de la transformación: Se ajustó un modelo lineal general, para errores heteroscedásticos para ambas variables respuesta.
- Ajuste del modelo nuevo y comprobación de los supuestos del modelo (repetición del paso 1): en este caso, los supuestos del modelo fueron obtenidos para la prueba de Shapiro-Wilks de normalidad, en ambos modelos para el FAVfn y FAVt como variables respuesta. Además, la prueba del Breusch-Pagan para comprobar la homoscedasticidad para cada modelo. La estimación de coeficientes, errores estándar, t-estadísticas, y p-valores se observan en las tablas 3 y 7. Los p-valores correspondientes para la prueba de bondad de ambos modelos se muestran más abajo.
- Selección del subconjunto de variables más significativas en la explicación de la variable respuesta mediante el procedimiento step-wise: Se realizó un procedimiento Step-Wise para descartar aquellas variables explicativas que no tienen una contribución significativa para explicar la variable respuesta FAV. El valor estimado del coeficiente, los errores estándar, el valor de la t-estadística, y los p-valores para la significación de cada una de las variables se demuestran en las tablas 4 y 8. Los p-valores correspondientes a la prueba de bondad (goodness of fit tests) de ambos modelos son mostrados más abajo.
- Definición de contrastes para comparar los valores medios de las variables respuesta bajo diversos niveles del factor: 1. **PM-PA Med. P:** mediano plazo de la propuesta municipal (PM) contra mediano plazo de la propuesta alternativa (PA) y 2. **PM-PA Largo. P:** largo plazo de la propuesta municipal contra largo plazo de la propuesta alternativa. En ambos ajustes, los valores medios de las variables respuesta eran perceptiblemente diferentes. (Tablas 5 y 9)

5. RESULTADOS

Como se ha expuesto, la contribución del análisis estadístico es doble: i. Provee un listado jerarquizado según su nivel de incidencia de las variables explicativas (morfológicas) para explicar las variables respuesta (indicadores energéticos), descartando todas las variables no-significativas; ii. aporta una herramienta de cálculo simple, mediante una ecuación sencilla.

Con el objeto de generalizar los resultados, a partir de un número limitado de casos, el Modelo Estadístico permitió correlacionar los valores del potencial solar del parque edilicio urbano actual y futuro de alta densidad, resultantes de las simulaciones realizadas con el modelo gráfico-computacional, con el conjunto de variables explicativas urbanas y edilicias. Dichas correlaciones permitieron identificar las alternativas morfológicas más eficientes para las situaciones analizadas.

- **Variable dependiente o explicada: FAVfn.**

Variables explicativas: Ancho de Calles, Retiros, Arbolado: magnitud, permeabilidad y completamiento, Morfología Edilicia, FOS y FOT.

Factor: Tiempo*propuesta

Modelo ajustado con todas las variables explicativas y el factor tiempo resulta:

Tabla 2

Resultados del Modelo Estadístico				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán.	t valor	Pr(> t)
(Intercepción)	0.949554	0.168343	5.641	5.06e-07 ***
PM Mid.P	-0.512681	0.244211	-2.099	0.04007 *
PM Largo.P	-0.485290	0.270713	-1.793	0.07816
PA Mid.P	-0.628119	0.318072	-1.975	0.05298
PA Largo.P	-0.598486	0.326782	-1.831	0.07208
Ancho Calle	-0.015263	0.004654	-3.280	0.00175 **
Retiros	1.821465	0.850975	2.140	0.03646 *
Mag. arb	0.036069	0.051082	0.706	0.48291
Perm. arb	-0.006575	0.029637	-0.222	0.82520
Comp. arb	-0.002301	0.001384	-1.662	0.10179
Morf. Edilic	0.020216	0.017124	1.181	0.24250
FOS	0.108460	0.221282	0.490	0.62585
FOT	-0.060459	0.031254	-1.934	0.05786

El test de la bondad de ajuste da un resultado aceptable aunque con un coeficiente de correlación relativamente bajo (si bien significativo)
Residual standard error: 0.2074 on 59 degrees of freedom. Multiple R-squared: 0.3936, Adjusted R-squared: 0.2703. F-statistic: 3.191 on 12 and 59 DF, p-valor: 0.001452

Análisis de los supuestos del modelo:

Normalidad: test de Shapiro-Wilks: p-valor=0.2159 para la hipótesis nula de normalidad. Con lo que podemos garantizar el supuesto de normalidad.

Homoscedasticidad: test de Breusch-Pagan, BP = 30.7699, df = 12, p-valor = 0.002136. Con lo que no podemos garantizar la homoscedasticidad.

La varianza de FAVfn en la situación actual es mucho mayor que la de esta variable en cada una de las otras dos situaciones (PM y PA) tanto a mediano como a largo plazo.

Dada la falta de homoscedasticidad del modelo, consideramos una transformación de la variable FAVfn que homogeneiza la varianza mediante una matriz diagonal W cuyos valores en la diagonal son inversos aditivos de las desviaciones típicas estimadas de FAVfn en cada situación.

Con esta transformación y llamando FAVfn2 a la variable FAVfn transformada, el modelo ajustado es:

Tabla 3

Resultados del Modelo Estadístico				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán.	t valor	Pr(> t)
(Intercepción)	3.126019	0.630837	4.955	6.41e-06 ***
PM Med.P	-0.271253	0.915136	-0.296	0.767960
PM Largo.P	-0.045762	1.014447	-0.045	0.964171
PA Med.P	0.072143	1.191919	0.061	0.951941
PA Largo.P	-0.787013	1.224559	-0.643	0.522915
Ancho Calle	-0.047557	0.017438	-2.727	0.008400 **
Retiros	12.121589	3.188877	3.801	0.000343 ***
Mag. arb	0.035905	0.191422	0.188	0.851859
Perm. arb	-0.012979	0.111060	-0.117	0.907368
Comp. arb	-0.005346	0.005188	-1.031	0.306963
Morf. Edilic	0.122935	0.064169	1.916	0.060241 .
FOS	0.246184	0.829216	0.297	0.767595
FOT	-0.431889	0.117118	-3.688	0.000495 ***

El test de la bondad de ajuste da un resultado muy bueno mostrado por su p-valor < 2.210-16
 Residual standard error: 1.776 on 59 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.8066, Adjusted R-squared: 0.7672
 F-statistic: 20.5 on 12 and 59 DF, p-value: < 2.2e-16

Análisis de los supuestos del modelo:

Normalidad: test de Shapiro-Wilks: W = 0.983, p-valor=0.2159 para la hipótesis nula de normalidad. Con lo que podemos garantizar el supuesto de normalidad.

Homoscedasticidad: test de Breusch-Pagan, BP = 16.8076, df = 12, p-valor = 0.157. Con lo que podemos garantizar la homoscedasticidad.

A los efectos de reducir el número de variables, se utilizó un procedimiento step-wise que arroja el siguiente modelo estimado:

Tabla 4

Resultados ajustados				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán	t valor	Pr(> t)
Situac.Actual	3.262625	0.395082	8.258	1.41e-11 ***
PM Med.P	3.079531	0.934350	3.296	0.001626 **
PM Largo.P	3.301196	1.056399	3.125	0.002705 **
PA Med.P	3.471212	1.153232	3.010	0.003775 **
PA Largo.P	2.605417	1.206796	2.159	0.034732 *
Ancho Calle	-0.048131	0.016507	-2.916	0.004932 **
Retiros	12.048680	3.106435	3.879	0.000257 ***
Comp. arb	-0.005049	0.003617	-1.396	0.167645
Morf. Edilic	0.115518	0.058078	1.989	0.051116.
FOT	-0.441238	0.109818	-4.018	0.000161 ***

Residual standard error: 0.7589 on 62 degrees of freedom. Multiple R-squared: 0.9569, Adjusted R-squared: 0.9499. F-statistic: 137.7 on 10 and 62 DF, p-value: < 2.2e-16

Para cada indicador de FAVfn es posible obtener, una ecuación, que se puede utilizar como herramienta práctica que permite inferir los valores de los indicadores, sin necesidad de recurrir al complejo procedimiento gráfico-computacional.

Las ecuaciones correspondientes para los 5 indicadores se presentan seguidamente:

$$\begin{aligned} \hat{E}(FAVfn(SitAct)) &= 1.0701 - 0.0158AC + 3.9517Ret - 0.0017Comp + 0.0379Morf - 0.1447FOT \\ \hat{E}(FAVfn(PM Med.P)) &= 0.4185 - 0.0062AC + 1.5455Ret - 0.0006Comp + 0.0148Morf - 0.0566FOT \\ \hat{E}(FAVfn(PM Largo.P)) &= 0.4024 - 0.0059AC + 1.4859Ret - 0.0006Comp + 0.0142Morf - 0.0544FOT \\ \hat{E}(FAVfn(PA Med.P)) &= 0.3403 - 0.0050AC + 1.2569Ret - 0.0005Comp + 0.0121B.Morf - 0.0460FOT \\ \hat{E}(FAVfn(PA Largo.P)) &= 0.4260 - 0.0063AC + 1.5731Ret - 0.0007Comp + 0.0151B.Morf - 0.0576FOT \end{aligned}$$

Comparaciones en el mediano y largo plazo entre los efectos medios de FAVfn producidos por la PM y la PA

El análisis de los contrastes ortogonales del cuadro anterior nos permite comparar el comportamiento de la variable FAVfn como variable explicada en las diferentes situaciones (situación actual, PM y PA en el mediano y el largo plazo). De él resulta que:

- Existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAVfn a mediano plazo cuando se aplica la propuesta municipal y cuando se aplica la propuesta alternativa. Esta significación está representada por un p-valor menor que 2×10^{-16} .
- Existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAVfn a largo plazo cuando se aplica la propuesta municipal y cuando se aplica la propuesta alternativa. Esta significación está representada por un p-valor de 3.77×10^{-9} .

Tabla 5

Comparación de la PM y PA					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
TiePMo	5	20.169	4.034	97.090	<2e-16***
PM-PA Med.P	1	10.920	10.920	262.842	<2e-16***
PM-PA Largo.P	1	1.945	1.945	46.810	3.77e-09***

• **Variable dependiente o explicada: FAVt**

Variables explicativas: Ancho de Calles, Retiros, Arbolado: magnitud, permeabilidad y completamiento, Morfología Edilicia, FOS y FOT.

Factor: Tiempo*propuesta

Modelo ajustado con todas las variables explicativas y el factor tiempo resulta:

Tabla 6

Resultados del Modelo Estadístico				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán.	t valor	Pr(> t)
(Intercepción)	1.836792	0.304930	6.024	1.18e-07 ***
PM Mid.P	-1.381876	0.442352	-3.124	0.002766 **
PM Largo.P	-1.097153	0.490356	-2.237	0.029046 *
PA Mid.P	-1.681885	0.576141	-2.919	0.004961 **
PA Largo.P	-1.610210	0.591919	-2.720	0.008556 **
Ancho Calle	-0.031419	0.008429	-3.727	0.000436 ***
Retiros	0.094748	1.541417	0.061	0.951194
Mag. arb	0.398173	0.092528	4.303	6.43e-05 ***
Perm. arb	-0.016303	0.053683	-0.304	0.762428
Comp. arb	-0.011449	0.002508	-4.566	0.000055 ***
Morf. Edilic	0.046421	0.031018	1.497	0.139824
FOS	2.284200	0.400821	5.699	4.06e-07 ***
FOT	-0.245192	0.056612	-4.331	5.84e-05 ***
El test de la bondad de ajuste da un resultado de ajuste muy significativo (p-value: < 2.2e-16). Residual standard error: 0.3757 on 59 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.8725, Adjusted R-squared: 0.8466 F-statistic: 33.65 on 12 and 59 DF, p-value: < 2.2e-16				

Análisis de los supuestos del modelo:

Normalidad: W = 0.9762, p-valor = 0.1899. Con lo que podemos garantizar el supuesto de normalidad.

Homoscedasticidad: BP = 25.1461, df = 12, p-valor = 0.01415. Por lo que no podemos garantizar la homoscedasticidad.

La varianza de FAVt en la situación actual es mucho mayor que la de esta variable en cada una de las otras dos situaciones (PM y PA) tanto a mediano como a largo plazo.

Dada la falta de homoscedasticidad del modelo, consideramos una transformación de la variable FAVt que homogeneiza la varianza mediante una matriz diagonal W cuyos valores en la diagonal son inversos aditivos de las desviaciones típicas estimadas de FAVt en cada situación.

Con esta transformación y llamando FAVt2 a la variable FAVt transformada, el modelo ajustado es:

Tabla 7

Resultados del Modelo Estadístico				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán	t valor	Pr(> t)
(Intercepción)	1.849960	0.353850	5.228	2.36e-06 ***
PM Mid.P	0.960771	0.513319	1.872	0.066210 .
PM Largo.P	3.089461	0.569025	5.429	1.12e-06 ***
PA Mid.P	0.633309	0.668573	0.947	0.347373
PA Largo.P	2.193486	0.686881	3.193	0.002257 **
Ancho Calle	-0.023626	0.009782	-2.415	0.018835 *
Retiros	-0.069667	1.788709	-0.039	0.969063
Mag. arb	0.332784	0.107373	3.099	0.002971 **
Perm. arb	-0.010267	0.062296	-0.165	0.869651
Comp. arb	-0.010219	0.002910	-3.512	0.000861 ***
Morf. Edilic	0.032363	0.035994	0.899	0.372242
FOS	3.584947	0.465125	7.707	1.71e-10 ***
FOT	-0.765006	0.065694	-11.645	< 2e-16 ***
El test de la bondad de ajuste da un resultado de ajuste muy significativo (p-value: < 2.2e-16). Residual standard error: 0.436 on 59 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.8553, Adjusted R-squared: 0.8259 F-statistic: 29.07 on 12 and 59 DF, p-value: < 2.2e-16				

Análisis de los supuestos del modelo:

Normalidad: test de Shapiro-Wilks: W = 0.9882, p-valor = 0.7383 para la hipótesis nula de normalidad. Con lo que podemos garantizar el supuesto de normalidad.

Homoscedasticidad: test de Breusch-Pagan, BP = 19.8213, df = 12, p-valor = 0.07054. Con lo que podemos garantizar la homoscedasticidad.

A los efectos de reducir el número de variables, utilizamos un procedimiento step-wise que arroja el siguiente modelo estimado:

Tabla 8

Resultados Ajustados				
Coefficientes:	Estimación	ErrorEstán	t valor	Pr(> t)
Situac.Actual	1.953932	0.320299	6.100	7.53e-08 ***
PM Med.P	3.125643	0.416761	7.500	2.92e-10 ***
PM Largo.P	5.261549	0.463274	11.357	< 2e-16 ***
PA Med.P	2.998893	0.394504	7.602	1.94e-10 ***
PA Largo.P	4.560009	0.408383	11.166	< 2e-16 ***
Ancho Calle	-0.023340	0.009420	-2.478	0.015961 *
Mag. arb	0.319195	0.086818	3.677	0.000496 ***
Comp. arb	-0.010270	0.002669	-3.848	0.000284 ***
SOF	3.424030	0.422522	8.104	2.61e-11 ***
FOT	-0.777539	0.059896	-12.981	< 2e-16 ***
Residual standard error: 0.4284 on 62 degrees of freedom. Multiple R-squared: 0.9784, Adjusted R-squared: 0.9749. F-statistic: 281.2 on 10 and 62 DF, p-value: < 2.2e-16				

Las ecuaciones correspondientes para los 5 indicadores se presentan seguidamente:

$$\begin{cases} \hat{E}(FAVt(SitAct)) = 1.7471 - 0.0209AC + 0.2854Magn - 0.0092Comp + 3.0616FOS - 0.6952FOT \\ \hat{E}(FAVt(PMMed.P)) = 0.9917 - 0.0074AC + 0.1013Magn - 0.0035Comp + 1.0864FOS - 0.2467FOT \\ \hat{E}(FAVt(PML arg.P)) = 1.8102 - 0.0080AC + 0.1098Magn - 0.0035Comp + 1.1780FOS - 0.2675FOT \\ \hat{E}(FAVt(PAMed.P)) = 0.4093 - 0.0032AC + 0.0436Magn - 0.0014Comp + 0.4674FOS - 0.1061FOT \\ \hat{E}(FAVt(PAL arg.P)) = 0.8539 - 0.0044AC + 0.0598Magn - 0.0019Comp + 0.6412FOS - 0.1456FOT \end{cases}$$

La extensión posible del uso de las ecuaciones derivadas del análisis a situaciones estructuralmente similares pero cuantitativamente diversas, constituye también un valioso aporte instrumental cuando se trate de establecer criterios de planificación urbana y energética, básicos para la elaboración de normas, que apunten a la consecución de una cuota mayor de sustentabilidad energética y ambiental en el desarrollo urbano hacia el futuro.

Comparaciones en el mediano y largo plazo entre los efectos medios de FAVt producidos por la PM y la PA

El análisis de los contrastes en el cuadro nos permite comparar el comportamiento de la variable FAVt como variable explicada en las diferentes situaciones (situación actual, PM y PA en el mediano y el largo plazo). De él resulta que:

Tabla 9

Comparación de la PM y PA					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
TiePMo	5	149.54	29.91	214.194	<2e-16***
PM-PA Med.P	1	131.96	131.96	945.106	<2e-16***
PM-PA Largo. P	1	3.77	3.77	27.000	2.41e-06***

-Existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAVt a mediano plazo cuando se aplica la propuesta municipal y cuando se aplica la propuesta alternativa. Esta significación está representada por un p-valor menor que 2×10^{-16} .

-Existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAVt a largo plazo cuando se aplica la propuesta municipal y cuando se aplica la propuesta alternativa. Esta significación está representada por un p.value de 2.41×10^{-6} .

Análisis de las variables explicativas más significativas:

El **FAVfn** y **FAVt** muestra alta significación respecto a la variación del FOT relacionada a la altura edilicia: la mayor densidad edilicia produciría una menor disponibilidad de energía por m^3 construido y un mayor enmascaramiento de las superficies potencialmente colectoras. Si bien las construcciones de varios niveles presentarían fachadas más altas al norte aumentando el área de captación y disminuyendo la relación entre áreas potencialmente colectoras, se observa un enmascaramiento sólido a corto plazo con una inequidad de acceso al recurso solar entre las construcciones nuevas y las construcciones preexistentes y un significativo aumento de este enmascaramiento a largo plazo.

La variable Ancho de Canal Vial influye en el acceso al recurso solar efectivo, en el caso de FAVfn la variable Retiro de torres es muy significativa y con valores más altos de disponibilidad solar a medida que aumenta la separación de las torres. Retiros mayores permitirán un menor enmascaramiento solar de fachadas potencialmente colectoras al norte y sobre canales viales de dirección este-oeste.

Observando los resultados obtenidos para FAVfn las variables: Morfología Edilicia demuestran tener una correlación con la variable respuesta. Resultan valores más altos del indicador para las situaciones compactas y homogéneas, esto puede explicarse porque en el caso de los conjuntos heterogéneos en altura, una mayor diversidad morfológica arroja situaciones desfavorables y enmascaramientos. Las situaciones homogéneas y compactas se acercan al diseño óptimo y uniforme para todo el conjunto.

Lo mismo ocurre con el indicador FOS en relación a FAVt, se observa una tendencia decreciente debido a la mayor disponibilidad de áreas colectoras, lo que podría deberse a factores negativos: una mayor ocupación del suelo es reflejada en una mayor superficie de techos potencialmente captadores de la energía solar.

El alto completamiento y la magnitud del arbolado en las manzanas urbanas suman una razón más para el bajo asoleamiento.

VARIABLES SIN TRANSFORMAR

En la Tabla 10 se presentan la comparación de los resultados medios de FAVfn a mediano y largo plazo. Se observan los impactos producidos por ambas propuestas de modificación al código: PM y PA.

Como era esperado, su variabilidad es mayor que los resultados de las simulaciones de ambas propuestas: proyecto municipal (PM) y proyecto alternativo (PA), con una desviación estándar de 0.328 (situación actual) contra 0.128 y 0.104 para la P.M. y PA respectivamente a mediano plazo, y 0.123 y 0.131 para la P.M. y el PA a largo plazo).

Los resultados de los valores medios mostrados para la variable FAVfn para el PA demuestran valores más altos que la P.M. (valor medio de 0.533 para FAVfn de la PA contra 0.441 de la P.M. a mediano plazo, y 0.506 para la PA contra 0.361 para la P.M. a largo plazo). Un comportamiento similar se observa en techos (Tabla 11).

Tabla 10

	FAVfn				
	medias	desviacion	cof de variac	Min.	Max.
Present S	0.6033333	0.3279753	0.544	0.11	1.26
PM Med. P	0.4410000	0.1282749	0.291	0.24	0.70
PA Med. P	0.5327273	0.1043160	1.960	0.33	0.72
PM Larg.P	0.3610000	0.1233288	0.334	0.18	0.53
PA Larg.P	0.5063636	0.1305582	0.244	0.32	0.76

Tabla 11

	FAVt				
	medias	desviacion	cof de variac	Min.	Max.
Present S	2.0973333	0.8941455	0.426	0.67	3.38
PM Med.P	0.6140000	0.3172871	0.517	0.27	1.24
PA Med.P	0.5327273	0.1043160	0.196	0.44	1.67
PM Larg.P	0.3610000	0.1364999	0.342	0.18	0.58
PA Larg.P	0.6109091	0.1872674	0.223	0.30	0.84

Es posible comparar las variabilidades a corto y largo plazo. A mediano plazo la **desviación** de la PM es mayor que la PA, motivada por la gran diferencia entre los niveles que propone la PM (morfologías de 3 niveles y de 18 niveles en una misma manzana)

VARIABLES TRANSFORMADAS

Media transformada FAVfn	Mínimo	Máximo	
PM Med. P	3.438	1.871	5.457
PA Med. P	5.107	3.163	6.902
PM Larg.P	2.992	1.460	4.297
PA Larg.P	3.878	2.451	5.821

Media transformada FAVt	Mínimo	Máximo	
PM Med. P	1.935	0.851	3.908
PA Med. P	2.539	1.279	4.854
PM Larg.P	2.645	1.319	4.297
PA Larg.P	3.262	1.602	4.486

En este caso, los valores medios del indicador FAVfn a Med. resultan en 3.44 para la PM y 5.11 para la PA. Las notables amplitudes de los rangos entre los valores de cada indicador, ponen en evidencia las importantes posibilidades de mejoramiento que podrían obtenerse mediante un adecuado diseño de las morfologías urbanas y edilicias en la región. Los valores de la media a Largo Plazo son menores que a Mediano Plazo motivados por la densificación futura que reduce el acceso al sol, sin embargo los valores de la media para la PA = 3.88 es significativamente mayor que para la PM= 2.90.

En el caso de los valores medios del indicador FAVt el comportamiento es similar al indicador FAVfn. Los valores de la media a Mid T es significativamente mayor para la PA= 2.54 que para PM=1.94 a Long T. Esta diferencia se mantiene considerando la máxima densificación posible para ambas alternativas PA= 3.26 y PM=2.64

6. CONCLUSIONES

En la presente investigación fue desarrollado un modelo estadístico lineal general con un factor y varias variables explicativas para cada versión del indicador FAV como variable respuesta. Los distintos niveles del factor fueron construidos como combinaciones de los períodos de tiempo (mediano y largo plazo) y bajo distintos escenarios: Propuesta Municipal y Propuesta Alternativa. (PM y PA). El análisis estadístico permitió comprender la significación de las variables explicativas: Ancho de Calles, Retiros, Arbolado: magnitud, permeabilidad y completamiento, Morfología Edilicia, FOS y FOT.

En la figura 4 se presentan los resultados del Modelo Gráfico- Computacional y Estadístico.

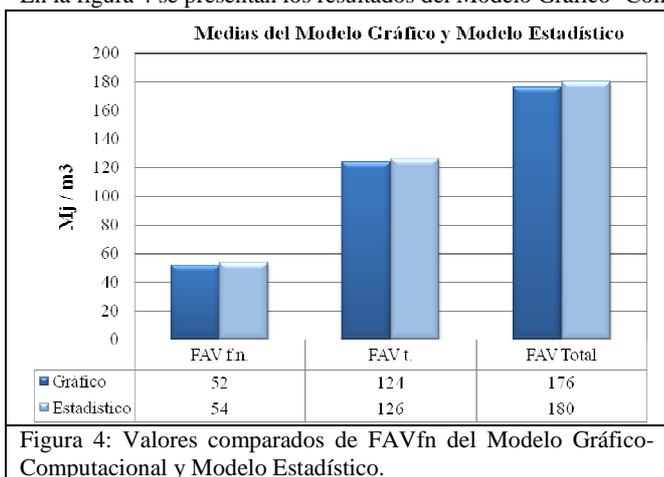


Figura 4: Valores comparados de FAVfn del Modelo Gráfico-Computacional y Modelo Estadístico.

Los resultados obtenidos por ambos métodos, gráfico-computacional y estadístico, fueron similares en los 70 casos de estudio analizados.

Volviendo a considerar el aspecto metodológico de este estudio, resulta indudable que el ajuste de los valores obtenidos mediante el Modelo Gráfico-Computacional y el Modelo estadístico es indicativo de la confiabilidad del método estadístico para el análisis de situaciones complejas, como las de la presente investigación, en las que se debe integrar la consideración de un número significativo de variables (variables explicativas), determinando en cada caso el peso relativo de cada variable sobre un determinado indicador (variable respuesta).

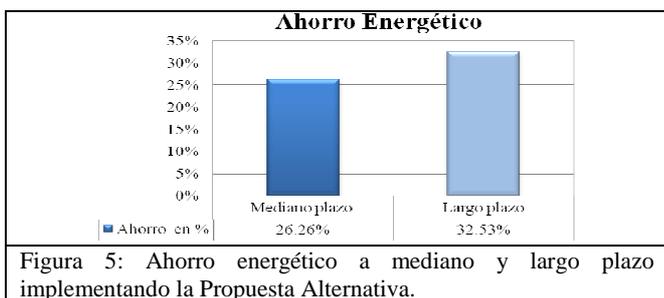


Figura 5: Ahorro energético a mediano y largo plazo implementando la Propuesta Alternativa.

En la Figura 5 se presentan los resultados del ahorro energético. Los valores obtenidos indican que de implementarse la propuesta municipal (PM) la reducción de la energía solar disponible por unidad de volumen construido sería: 26,26% a mediano plazo y 32,53% a largo plazo, comparada con la propuesta alternativa (PA) con lo que se concluye que existen diferencias altamente significativas entre los valores medios de FAV a mediano y largo plazo cuando se aplica la PM y cuando se aplica la PA.

Por último, cabe mencionar que la generación de las ecuaciones logradas mediante el uso del Modelo Estadístico constituye un aporte metodológico y práctico de primera magnitud para el desarrollo de investigaciones futuras en la problemática del uso del recurso solar en medios urbanos de la región y por lo tanto, uno de los resultados más valiosos de esta investigación. En este sentido el estudio en avance de la "FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SECTOR EDIFICIO URBANO" y las propuestas de normativas municipales para la implementación progresiva de dichas estrategias son fundamentales.

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de la Energía. Estadísticas de la AIE © OCDE/AIE, <http://www.iea.org/stats/index.asp>. 2009.
- Arboit, A Diblasi, A.; Fernandez Llano, J. C. de Rosa, C. "Assessing the solar potential of low density urban environments in andean cities with desert climates - The case of the city of Mendoza, in Argentina". *Renewable Energy*. Elsevier Editorial System. Volum. 33 Tomo 8, p.1733-1748. ISSN: 0960-1481. *Renewable Energy*. Oxford UK. 2008.
- Arboit, M.; Mesa, A Diblasi, A.; Fernandez Llano, J. C. y de Rosa, C. 2010. "Assessing the solar potential of low density urban environments in andean cities with desert climates - The case of the city of Mendoza, in Argentina. 2nd. Part". *Renewable Energy*. Elsevier Editorial System. Vol. 35 p.1551-1558 ISSN 0960-1481. UK.
- Arboit, M, de Rosa, C. "Modelando la sostenibilidad energética ambiental de entornos urbanos de alta densidad como resultado de la implementación de reformas al Código Urbano y de Edificación de la Ciudad de Mendoza". ISES, Brasil. 2012 (T. Aprobado)
- Basso M., Fernández Llano J., Mesa A., De Rosa C. "Morfología para la Eficiencia Energética del Sector Edificio Urbano En El Área Metropolitana De Mendoza". AVERMA. Vol.5 N°2. pps. 07.19. ISSN 0329-.5184. 2001.
- Balcomb J. D, et al.: *Passive Solar Design Handbook*. Vol. 3. American Solar Energy Society, Inc New York. 1983
- Breheny, M. "Centrists, Decentrists and Compromisers: Views on the Future of Urban Form. The Compact City. A Sustainable Urban Form?". E&FN SPON. UK. 1996.
- Correa, E. Tesis Doctoral: "Isla de Calor Urbana – El caso del Área Metropolitana de Mendoza. Universidad Nacional de Salta". Inédito. 2008.
- Dirección de Planificación Urbanística, Municipalidad de la Ciudad de Mendoza. Ordenanza de Zonificación por Indicadores Urbanos. 2009.
- Dresner, Simon. "The Principles of Sustainability". Earthscan, London. 2001.
- Meadows D.H, Randers J & Meadows D.L: "Limits to Growth". The 30-Year Update. Chelsea Green. 2004
- Mesa NA, et. al. "Determinación de áreas de fachadas potencialmente colectoras en medios urbanos, a través de un modelo gráfico computacional". *Memorias from the: ISES Millennium Solar Forum*. ANES, México, DF. 2000.
- Nicolini, A., "Las Cuatro Etapas de la Ciudad Argentina". Cuaderno Temático N° 9. Tucumán, 1990.
- Ruiz de Lima, G.: "Mendoza, Metrópolis Regional en Transformación". *Revista GeoNotas*, Vol. 4. Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. INCA Editorial. 2000.
- Union of Concerned Scientists. (UCS): "World Scientists Warning to Humanity"; USA, 1992.
- Weisman, M. "La Estructura Histórica del Entorno". Ediciones Infinito: Buenos Aires. 1975.

ABSTRACT

The factibility of using the generous regional solar resource in buildings in Mendoza's Metropolitan Area for space and domestic water heating, has already been demonstrated. In high density urban environments, the use of passive solar systems coupled to additional conservation measures will allow substantial energy savings in winter's energy expenditures. In that respect, the protection of solar access in urban codes and the proposals for municipal norms to progressively implement such strategies, are fundamental.

The study presents a statistical methodology that allows to comparatively assess two normative proposals for modifying the Urban and Building code of the city of Mendoza (Argentina) with the purpose of determining the present and future urban design strategies, departing from the analysis of the energy and environmental consequences of implementing such strategies, as functions of their morphological features and the available solar resource. In a previous stage the reduction of solar access has been assessed by comparing the reference situation (present without changes) related to mid and long time future evolution, resulting from the simulated implementation of both new proposals: Municipal (PM) and Alternative (AP) developed by the I+D unit.

On a second stage, a statistical methodology for the analysis of both proposals has been developed; it allows determining the relative weight of each urban and building variable on the Volumetric Insolation Factor (VIF), proposing besides a simple equation that allows calculating the value of the indicator, this being the substantial contribution of this study.

The results obtained indicate that, if the MP were implemented, the reduction of available solar energy per built unit volume, would be 26.26 % in mid-time terms and 32.53 % in long term ones. When comparing these results to those of the AP, it is clear that significant differences are favouring the performance of the latter. Presently, two important variables are being incorporated to the models: the Maximum Building Height and the Homogeneity Index, for further adjusting of the model.