

## **DETERMINACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR, EN CAÑONES URBANOS CON ALTA INCIDENCIA DEL ARBOLADO**

Alejandro Mesa<sup>1</sup>, Mariela Arboit<sup>2</sup>, Carlos de Rosa<sup>3</sup>  
Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales. INCIHUSA  
Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV) CONICET  
C.C.131. (5500) Mendoza, Argentina. Tel. +54-0261-524-4054  
E-mail: [amesa@lab.cricyt.edu.ar](mailto:amesa@lab.cricyt.edu.ar)

**RESUMEN:** Dentro de la estructura urbana, la disponibilidad del recurso solar, depende esencialmente de las características morfológicas de cada entorno. Conocer con precisión, la disponibilidad del acceso a los recursos energéticos renovables, permitiría avanzar en la planificación del crecimiento urbano dentro de un marco de desarrollo más sustentable.

Teniendo como antecedentes para el cálculo de las áreas edilicias bajo la incidencia de la radiación solar directa, un modelo gráfico - computacional desarrollado en la unidad, se avanzó en la búsqueda de un método que permita determinar la incidencia de cada componente de la radiación (directa, difusa y reflejada).

El modelo gráfico-computacional ya desarrollado, toma en cuenta solamente el acceso a la componente directa de la radiación solar, en medios urbanos las componentes difusa y reflejada adquieren una significativa relevancia aún en días soleados, pero por las características de los mismos son difíciles de cuantificar.

El trabajo presenta los primeros resultados del estudio de evaluación del potencial solar en entornos urbanos del Área Metropolitana de Mendoza, considerando a la radiación total incidente como la suma de sus tres componentes.

**Palabras clave:** radiación solar, componentes directa, reflejada y difusa, morfología urbana.

### **INTRODUCCION**

El espacio urbano consolidado del Área Metropolitana de Mendoza (AMM), se caracteriza por la fuerte presencia de canales viales cubiertos de frondosas líneas de arbolado que bordean la estructura de las manzanas conformando “pantallas verdes” (figura 1), habiendo, a lo largo del tiempo, transformado el carácter desértico de la zona en un oasis apto para el desarrollo de las actividades humanas.

Con la premisa de poder avanzar en la cuantificación del potencial solar disponible, es fundamental poder determinar la fuente de radiación incidente sobre un edificio. Considerando las particulares características de la estructura edilicia, que condicionan de manera significativa el acceso y la disponibilidad de recursos climáticos, en un día claro, el impacto de la radiación reflejada por un plano vertical soleado puede aumentar considerablemente la disponibilidad de radiación solar que llega a la fachada opuesta. Los planos verticales y horizontales deben ser considerados como potenciales elementos captadores de los edificios, fundamentalmente en regiones de cielo claro con amplia disponibilidad de recurso solar.

La evaluación de los antecedentes existentes referida a los programas basados en el análisis de modelos geométricos, que permiten el cálculo de la radiación incidente sobre los distintos paramentos de una edificación (Ecotect, Radiance, Townscope), permitió determinar que los mismos, no daban una respuesta ajustada a la realidad de entornos evaluados, donde la incidencia del arbolado es muy importante.

Existiendo un modelo gráfico-computacional desarrollado en la UID, (Mesa et al, 2000) que toma en cuenta la incidencia de la componente directa de la radiación solar, en la presente etapa se avanzó sobre una metodología de cálculo que permita estimar la magnitud de cada componente de la radiación solar incidente (directa, difusa y reflejada) sobre una edificación inserta en entornos urbanos consolidados, ya que las mismas, adquieren una significativa relevancia aún en días soleados, pero que por las características de los mismos es difícil de cuantificar. Teniendo en cuenta la incidencia del entorno próximo, a la potencial captación de un paramento vertical de una edificación, se definieron 4 fuentes de radiación a evaluar:

- Componente directa CD: haz de radiación unidireccional, cuya dirección e intensidad varía por la posición relativa solar, en su recorrido frente a una superficie.
- Componente difusa Cd: radiación procedente de la bóveda celeste, (sin considerar la componente solar directa), producida por la dispersión de la atmósfera y la reflexión de las nubes.
- Componente reflejada del terreno CRTe: radiación que proviene de la reflexión de las superficies del entorno por debajo del horizonte.
- Componente reflejada por obstáculos CROb: radiación proveniente de la reflexión de los obstáculos del entorno por encima de la línea de horizonte (figura 2).

<sup>1</sup> Investigador Asistente CONICET; <sup>2</sup> Becario Doctoral CONICET; <sup>3</sup> Investigador Principal CONICET

## DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

La metodología desarrollada permite calcular el porcentaje de participación de cada componente de radiación solar, potencialmente disponible sobre un paramento vertical o inclinado, a partir del análisis de imágenes digitales, tomadas desde el centro del área a evaluar.

Dadas las particularidades de cada sitio, los resultados obtenidos serán disímiles, pero el análisis estadístico de los mismos, permitirá identificar las variables principales incidentes dentro de las características repetitivas de cada entorno. (figura 1 y 2).

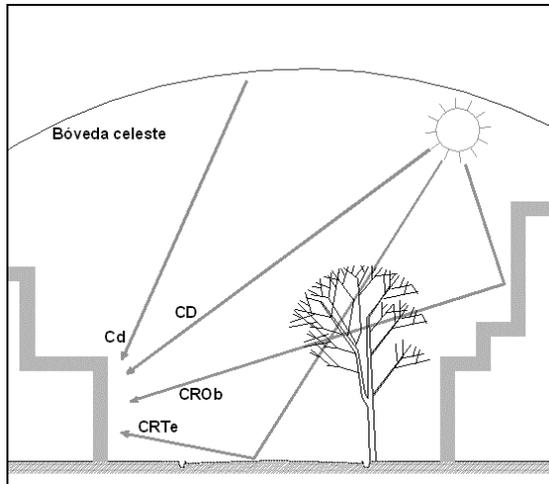


Figura 1: Componentes de la radiación solar incidentes sobre una edificación en entornos urbanos consolidados

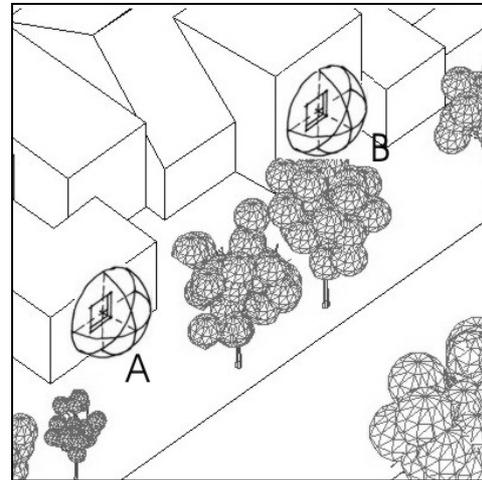


Figura 2: Imagen de la localización de los distintos puntos de los entornos evaluados.

### Toma de las imágenes

Para la obtención de datos más confiables, retirando del proceso de medición cualquier error humano posible, se consideró el empleo de fotografías digitales en formato JPG, las cuales pueden analizarse con software de procesamiento de imágenes. La alternativa elegida para la captura de las mismas fue la utilización de fotografías hemisféricas. Las mismas proporcionan una proyección de un hemisferio en un plano (ángulo de captura extremo generalmente de 180°), obteniendo un registro permanente del sitio que puede ser luego analizado para determinar qué partes del cielo son visibles, qué objetos son fuentes secundarias de reflexión y cuales son los factores de obstrucción del entorno urbano analizado.

Para evitar imprecisiones en la toma de imágenes, todo el equipo fue montado sobre un trípode regulable, asegurando el nivelado horizontal de la cámara a la altura adecuada sobre el suelo y orientación de la lente, hacia el Ecuador, siendo preciso en mantener el cuerpo fuera del ángulo de visión del lente. Para la nivelación se utilizaron niveles de burbuja en los sentidos x e y, y una brújula para el direccionado de la lente.

Posteriormente las imágenes son analizadas mediante software de procesamiento de imágenes con el fin de obtener, en base a la geometría evaluada, los valores de la visibilidad del firmamento y obstrucción del mismo, calcular regímenes de radiación solar, las diferencias en la morfología arquitectónica, materiales utilizados (albedo), y los concernientes al arbolado urbano (especies, sitio y edad).

En el caso evaluado se utilizó una cámara digital Nikon Cool Pix 5400, sensor de imagen tipo CCD, resolución total 5.26 MP, resolución efectiva 5.1 MP, distancia focal 5.8 - 24.0 mm (equivalente 35 mm: 28 - 116 mm), zoom óptico 4x - digital 4x, apertura máxima (W-T) f2.8 - f4.6. Equipada con una lente Nikon FC E9, tipo convertidor, función especial: ojo de pez, ampliación: 0.2, construcción de la lente: 4 grupo(s) / 6 elemento(s).

### Determinación de la grilla angular

Una proyección hemisférica, tomada en sentido perpendicular al suelo, da un campo de visión de 180°, y corresponde a la imagen circular resultante de una vista completa de todas las direcciones de la bóveda celeste. La distancia en una foto hemisférica corresponde a ángulos, no a distancia. Cada punto corresponde a una coordenada referida al ángulo respecto del cenit y un azimut, en un sistema hemisférico de coordenadas.

Como en el caso evaluado el eje de las imágenes digitales no es perpendicular al suelo, sino paralelo al mismo, se plantea la necesidad de determinar una grilla de análisis, sobre la cual poder determinar las distintas áreas angulares. En la grilla angular planteada, el punto central de la misma corresponde a la dirección del Ecuador (Norte en el hemisferio sur), la línea horizontal determina el Horizonte Teórico, por encima de la misma se extiende el área correspondiente a la bóveda celeste y por debajo al cuarto de bóveda terrestre. Tiene una graduación de 10° en el sentido de las alturas y en el del azimut, esto delimita 244 secciones angulares equivalentes

Para el análisis entonces se adoptó la perspectiva estereográfica de la bóveda sobre un plano bidimensional, basado en la teoría de Lynes (Lynes, J.A, 1968) de la proyección de la hemiesfera unitaria, donde el área corresponde entonces a un área angular a lo largo de un hemisferio de direcciones. Para corregir la deformación de la proyección de una sección

tridimensional sobre un plano, se utiliza un factor de ponderación, determinado por el autor para cada sección de la hemisfera. (Figura 3 y 4)

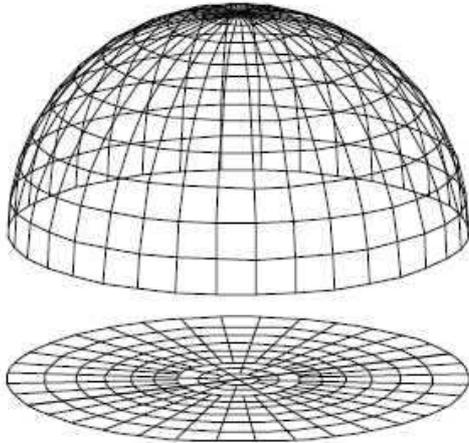


Figura 3: Proyección estereográfica de la bóveda celeste, sobre un plano bidimensional, en secciones de 10° de altitud por 10° de azimut ( Gonçalves, 1997)

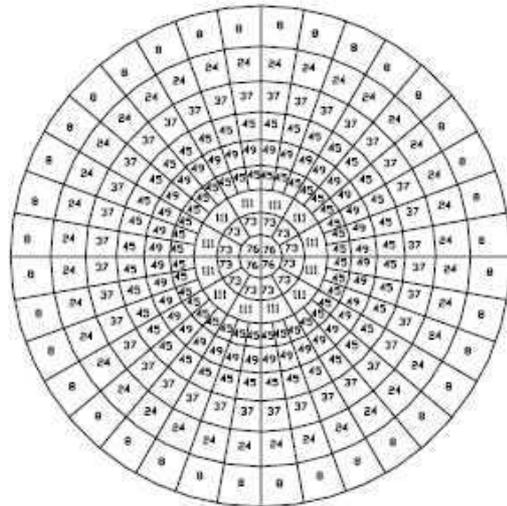


Figura 4: Cuantificación del factor de ponderación del incremento azimutal de cada sección de la bóveda, basado en la teoría de la esfera unitaria ( Gonçalves, 1997)

## ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS

### Determinación de las obstrucciones solares y del horizonte real

Una vez definidas las herramientas de cálculo se puede iniciar la etapa correspondiente al procesamiento de imágenes. Teniendo como objetivo de esta etapa la cuantificación de la incidencia de cada componente solar (directa, difusa y reflejada), sobre la radiación incidente sobre una superficie vertical en un entorno urbano consolidado, es necesario ponderar las áreas de obstrucción y reflexión del entorno.

La radiación solar efectiva que recibe en el edificio esta siempre limitada por las sombras arrojadas por obstáculos del entorno. Para cuantificar esta incidencia se debe considerar la altura y dirección en que se encuentran árboles y edificios cercanos que interrumpen (total o parcialmente) la llegada de los rayos del sol al lugar en que se encuentra la edificación.

Una herramienta práctica de evaluación son las cartas solares estereográficas, porque ofrece una imagen fácil de interpretar para estudio de las sombras proyectadas por los edificios y obstáculos sobre una superficie. Cuando se superponen los recorridos solares de la carta solar estereográfica se pueden estudiar los periodos en que el sol estaría oculto por las obstrucciones.

La línea que delimita las obstrucciones de la visión de bóveda es lo que se define como Horizonte Real y su determinación se puede realizar con tomas de datos de campo de la orientación respecto al Ecuador o azimut de cada punto la silueta, y la altura real sobre el horizonte de cada punto singular. La medición de los mismos puede realizarse a través de medios gráficos o manuales desde la altura real de cada punto singular a ser evaluado, o por medios analíticos en caso de simulaciones. En el caso de la metodología utilizada el horizonte real se obtiene superponiendo una grilla angular de análisis con los recorridos solares de la carta solar estereográfica, sobre la imagen fotográfica. De esta forma, se puede evaluar durante que periodos del día de cada estación del año, el sol llega libre de la incidencia de las obstrucciones sólidas, o bajo la incidencia de las obstrucciones permeables, como el arbolado urbano (figura 5).

El valor del denominado horizonte real, es particular de cada caso analizado, ya que al variar la altura de la toma de la imagen, varía la incidencia de las obstrucciones próximas (figura 6 a y 6 b).

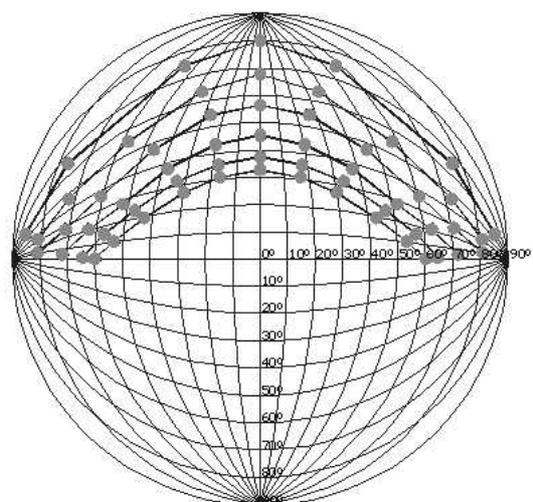


Figura 5: Grilla angular de obstrucciones para 32.85° de latitud Sur

Las obstrucciones continuas en torno a una fachada, forman una mascara de altura uniforme, como puede ser el caso de montañas lejanas, o una obstrucción plana continua, como una fachada edilicia de altura constante. En los dos casos analizados, si bien el entorno próximo es el mismo, los porcentajes de incidencia de cada componente van a ser distintos, en

forma proporcional a la variación a la participación de cada uno en la semiesfera resultante de la imagen tomada de cada punto (C en figura 7a y D en figura 7b).

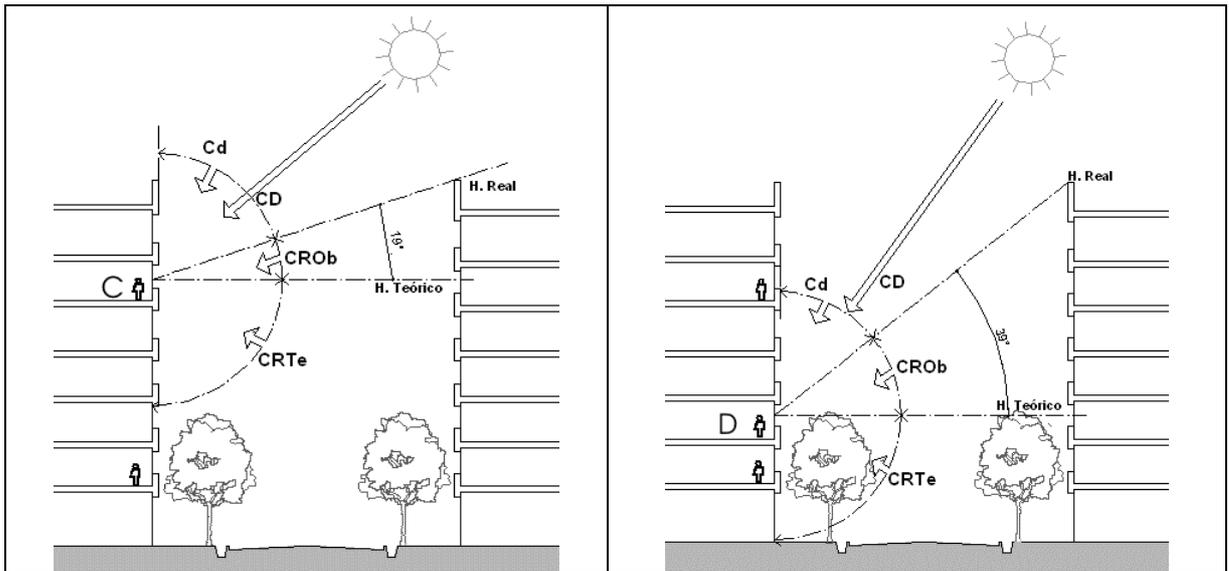


Figura 7 a y b: Variación de incidencia de las distintas componentes según la altura de la toma.

En el caso de una obstrucción plana continua, como las fachadas “corridas” al otro lado de la calle, la obstrucción del cielo sería máxima en la dirección perpendicular al plano, y la franja que oculta los recorridos solares obstruidos por el entorno, seguiría la línea del ángulo correspondiente. El solo hecho de cambiar la altura de la toma (9 metros de altura) en el caso citado, hace que los resultados de obstrucción de la bóveda celeste varíen de porcentajes del 21.11% en el primer caso al 43.33% en el segundo. En el momento de evaluar la incidencia de estos valores, determinan que en el segundo caso no se podrá contar con el recurso solar en todo el período de mayores requerimientos de calefacción (Junio-Agosto), y en las primeras y últimas horas de todos los días del año, mientras que en el primer caso, sólo se reduce la captación antes de las 8.00 y después de las 16.00 horas.

#### ANÁLISIS DE CASOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para obtener los primeros resultados de la utilización del modelo se analizaron distintos entornos urbanos residenciales de características disímiles, correspondientes al Área Metropolitana de Mendoza. En la primera evaluación se evaluaron entornos de distintas características geométricas, ancho de calle y vereda, densidad y altura de las construcciones próximas (figura 8). En el segundo análisis se evaluó la incidencia de las obstrucciones y elementos reflejantes ante la variación de la altura la toma de las fotos. Las imágenes hemisféricas obtenidas, son transformadas en los esquemas síntesis de composición de cada entorno evaluado, a través de programas gráficos de cálculo (Autocad<sup>R</sup>). De los mismos se obtienen las superficies relativas correspondientes a cada elemento (obstrucción sólida, obstrucción permeable, superficies reflejantes, etc.), valor que multiplicado por el factor de ponderación de la proyección bidimensional, nos da la relación porcentual de incidencia de cada elemento (figura 4).

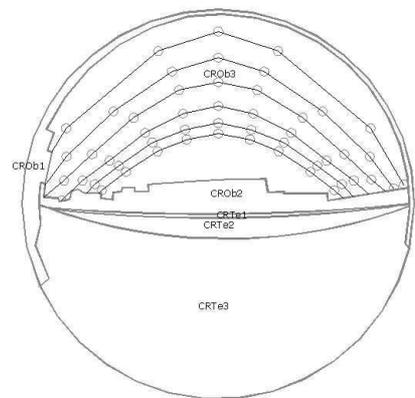


Figura 8 b: Caso 1 área de baja densidad, ancho de calle 30 metros

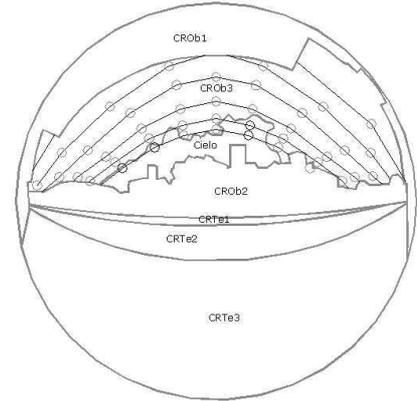


Figura 8 a: Caso 2 área de baja densidad, ancho de calle 15 metros

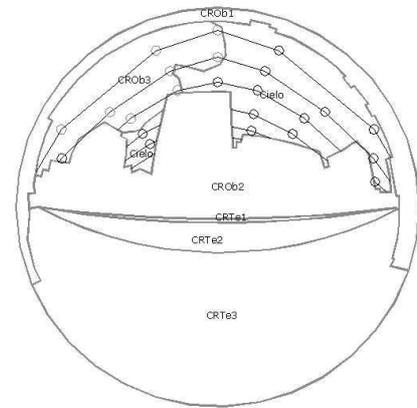


Figura 8 C: Caso 3 área de baja densidad, ancho de calle 20 metros

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los casos en estudio han sido estructurados de modo de determinar para cada plano, las áreas de bloqueo de la radiación solar en función de la morfología del entorno circundante. Se obtuvo los porcentajes de horas de obstrucción a la radiación solar, por parte del entorno, se cuantificaron las áreas reflectantes según su posición y material y en el caso del arbolado urbano las características morfológicas y de permeabilidad del mismo (tabla 1).

Caso	CROb1	CROb2	CROb3	CRTe1	CRTe2	CRTe3
1	Aleros y salientes propias de la edificación	Paramentos verticales bajos de colores variados	Especies varias	Baldosa calcárea gris	Hormigón	Baldosa calcárea negra
2	Aleros y salientes propias de la edificación	Paramentos verticales bajos de colores claros	Especies varias	Baldosa calcárea gris	Hormigón	Baldosa calcárea gris
3	Aleros y salientes propias de la edificación	Paramentos verticales de altura y colores variables	Especies varias	Baldosa calcárea de colores variados	Asfalto	Baldosa calcárea de colores variados

Tabla 1: Características materiales de cada caso evaluado.

El segundo análisis corresponde al área central de la Ciudad Capital de Mendoza, evaluando la situación de un edificio de propiedad horizontal. Las distintas altura de la toma de las imágenes fueron a nivel de vereda (+0.00), en el 2° y 4° piso (figura 9).



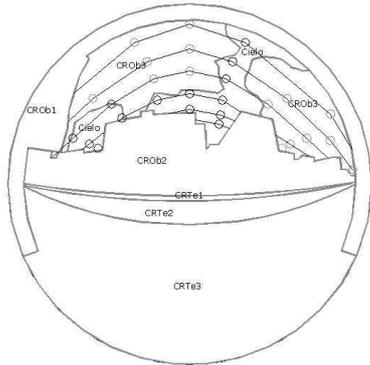
Toma de la imagen: nivel 0.00



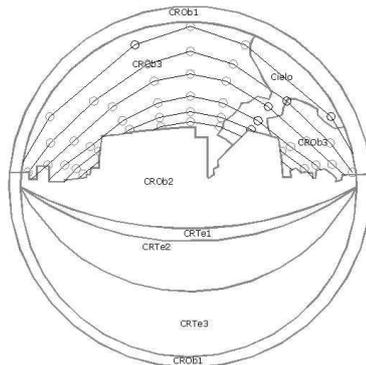
Toma de la imagen: nivel +6.00



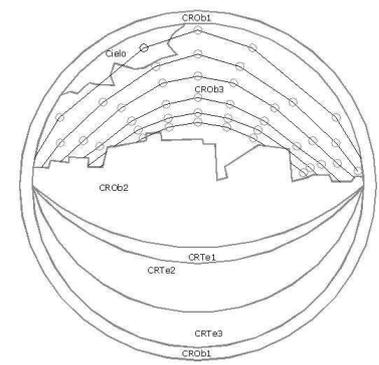
Toma de la imagen: nivel +12.00



Esquema síntesis nivel 0.00



Esquema síntesis nivel +6.00

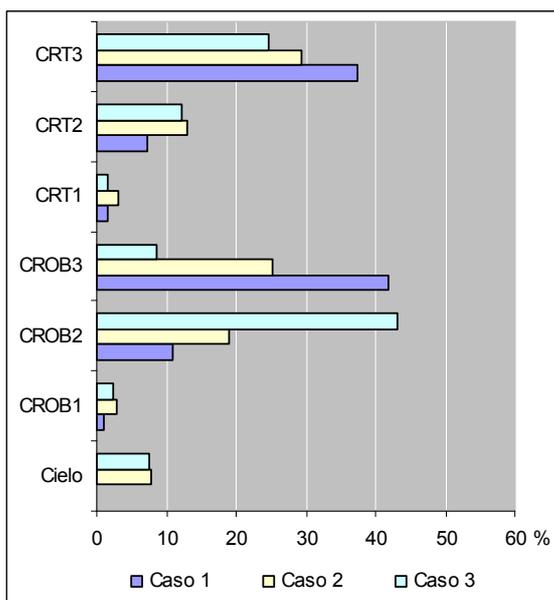


Esquema síntesis nivel +12.00

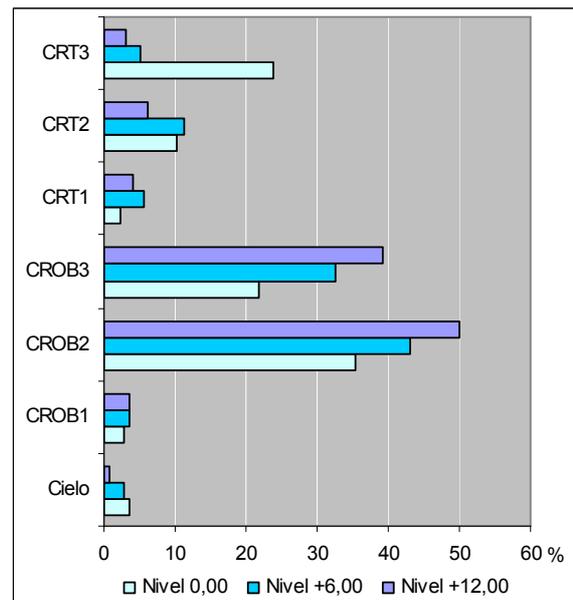
Figura 9: Caso 4 de análisis, área de alta densidad del AMM, imágenes y esquemas síntesis.

De los esquemas síntesis de cada caso se extrae la información necesaria para poder determinar disponibilidad potencial del recurso solar en su componente directa y la participación porcentual de las otras componentes (difusa y reflejada).

En los casos analizados los resultados son disímiles, dadas las características de las zonas evaluadas (gráfica 1). En todos los casos el porcentaje de cielo visible libre de obstrucciones (sólidas y permeables) es mínimo o nulo. Las superficies próximas reflectantes (CRT3) tienen una alta participación en los porcentajes totales (variaciones del 25 al 37%), lo que demuestra la necesidad del tratamiento de dichas superficies para controlar su incidencia. La participación de la obstrucción del arbolado (CROB3) es máxima en el Caso 3 llegando a valores superiores al 40%, en todos los casos las especies existentes son variadas de ahí que sea necesario considerar la permeabilidad promedio de las mismas. Estos resultados deben de ser afectados por los valores porcentuales de bloqueo temporales (intrínsecos a cada especie) a los efectos de obtener las áreas efectivas de sombra (Cantón et al, 2003). Es importante contemplar el tipo de especie que se utiliza, para evitar obstrucciones en épocas donde se requiere que las mismas tengan alta permeabilidad.



Gráfica 1: Resultados porcentuales del análisis de los Casos 1 a 3



Gráfica 2: Resultados porcentuales del análisis del Caso 4

En los valores obtenidos del Caso 4, (gráfica 2) se identifica la correlación existente entre la altura de la toma de imagen y los valores de porcentuales de los elementos de obstrucción sólida (CROB2) y reflejantes (CRT3). El primero mantiene una relación directa (aumenta a medida que ascendemos), y el segundo disminuye con la altura. La variación en cada caso llega a valores superiores al 200% (CRT3), siendo lineal en el caso de las obstrucciones sólidas (variación del 15%) y en la incidencia del arbolado (CROB3).

## CONCLUSIONES

La metodología de prediseño presentada, es una herramienta de fácil utilización, que brinda un resultado preciso de evaluación en entornos urbanos, cuyas características dificulten el cálculo por otros medios. La utilización de los resultados obtenidos de la evaluación de los distintos sectores de la ciudad, (horas de radiación disponible, períodos de obstrucciones y elementos que las producen, masivos o permeables, incidencia de las superficies reflejantes) permitirá determinar en cada caso, según sus características morfológico- constructivas, la incidencia de cada componente de la radiación solar incidente sobre los paramentos de las edificaciones y así volcar los resultados en lineamientos normativos que tiendan a la eficiencia del aprovechamiento de los recursos energéticos renovables.

La radiación solar potencial en entornos urbanos consolidados depende en gran parte de la reflexión del terreno y de los obstáculos visuales enfrentados a las ventanas. Considerar valores porcentuales de superficies horizontales próximas a una abertura vidriada, superiores al 40%, Caso 3 (Gráfica 1), implica la necesidad del tratamiento de las mismas, para obtener un diseño apropiado (materiales, albedo, características térmicas) y así aprovechar o neutralizar su incidencia según los requerimientos bioclimáticos de la zona.

Se prevé en una siguiente etapa, realizar un catálogo de los materiales más usualmente utilizados en la zona para el sellado de las áreas públicas (calles y veredas), sus características térmicas y ópticas identificando de modo mas concreto la incidencia de las mismas sobre los paramentos verticales de las edificaciones próximas.

## REFERENCIAS

- Cantón M.A., Mesa A., Cortegos J.L.; de Rosa C.(2003) Assessing the solar resource in forested urban environments results from the use of a photographic-computational method, *Architectural Science Review*, Vol. 46, N° 1, pp. 1-9. Ed. H.J. Cowan, Sydney Australia.
- Chapman L., Thornes J.E. and Bradley A.V., (2008) Rapid Determination of Canyon Geometry Parameters for use in Surface Radiation Budgets. School of Geography & Environmental Sciences, The University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK, Online Draft Reports, <http://www.cert.bham.ac.uk>, Mayo 2008.
- Correa, Erica.; Pattini, Andrea; Córca, M. Lorena1; Fornés, Matías; Lesino, Graciela, (2005) Evaluación del factor de visión de cielo a partir del procesamiento digital de imágenes hemisféricas. Influencia de la configuración del canon urbano en la disponibilidad del recurso solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 9, 2005. ISSN 0329-5184.
- Cremasco V, Dupagne Albert (2007) Radiation-Solar Comfort Early Analysis in High Density Urban Context. LEMA-University of Liege. Chemin des Chevreuils, Liege. Belgium [www.cardiff.ac.uk](http://www.cardiff.ac.uk) Febrero 2007.
- Eguía Susana, Evans John Martin, Evans Julian, Pérez Alejandro (2006) Impacto solar en fachadas. Metodología para la determinación de características termo-luminicas en envolventes vidriadas. ENTAC, Julho 2004, São Paulo.
- Gonçalves De Souza Roberta Vieira (1997) Iluminação Natural em Edificações: cálculo de iluminâncias internas desenvolvimento de ferramenta simplificada. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
- Gonçalves De Souza Roberta Vieira (2004) Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a descrição dos fenômenos de iluminação natural externa e interna. Tesis Doctoral. UF de Santa Catarina Programa de Pós Graduação.
- Lynes, J.A. (1968) Principles of natural lighting. Elsevier Publishing Company, Usa.
- Roxburgh Jason R. and Kelly Dave (1995) Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments. *New Zealand Journal of Ecology* 19 (2): 213-217 New Zealand Ecological Society.
- Sillion F., and Puech C.8 (1989). A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. *Computer Graphics SIGGRAPH* 89, pp. 335-344.

## ABSTRACT

The availability of the solar resource within the urban structure, essentially depends on the morphological features of each immediate environment. The precise knowledge of the access to the renewable resources, would allow advancing on the planning of urban growth within the framework of a more sustainable development.

Having as background the tool for calculating the areas insolated by the direct component of solar radiation, a graphic-computational model developed in the R+D unit, it was attempted to advance now on the search for a method that would permit determining the incidence of each component of the solar radiation (direct, diffuse and reflected).

The graphic-computational model already operative, only takes into account the access to the direct component of solar radiation. In urban scenery the diffuse and reflected components reach a significant relevance, even in clear days, but, due to the complexity of their features they are difficult to quantify.

The paper presents the first results of a study aimed at evaluating the solar potential of urban environments in Mendoza's Metropolitan Area (MMA), considering the total impinging radiation as the sum of its three components.