

LAS ESCALAS DE LA LUZ

Benoit Beckers

Profesor. Grupo de investigación Avenues

benoit.beckers@utc.fr

Departamento de Ingeniería de los Sistemas Urbanos
 Universidad de Tecnología de Compiègne
 Centre Pierre Guillaumat 2, 60203 Compiègne cedex, Francia
 Teléfono +33 (0)3 44 23 44 23
www.heliodon.net

Palabras clave: Radiación solar, iluminación natural, arquitectura, urbanismo.

Key words: Solar Radiation, Daylight, Architecture, Urbanism.

Resumen

Variando con el paso del día y del año, la luz del Sol y del cielo modula, visual y energéticamente, los territorios, las ciudades y los edificios. ¿Cómo sintetizar y manejar en el proyecto estas informaciones donde se mezcla el azar de las nubes pasajeras con la regularidad astronómica de los trayectos solares?

En cuanto a las herramientas de simulación, el mayor avance de estos últimos años se ha producido en los programas de renderización, con los cuales nos vemos forzados a construir la iluminación de una escena a partir de distintos componentes, cada uno de los cuales requiriendo su propia algorítmica: luz directa del Sol, abertura al cielo, reflexión difusa y especular de Sol y cielo.

Veremos primero que la mejor manera de entrar estos componentes en una lógica de diseño (y ya no solamente de análisis) consiste en aprovechar las propiedades geométricas de diferentes proyecciones: estereográfica, equivalente, ortogonal, gnomónica, isócrona,...

Recordaremos también que el componente aparentemente más sencillo – los trayectos solares – nos conduce ya a un problema de cinco dimensiones. Con el ejemplo del programa “Heliodon 2”, [Beckers & Masset, 2009], indicaremos las formas de diseñar con la doble geometría del Sol y del cielo.

Por el crecimiento y la necesaria densificación de nuestras ciudades, nuevos problemas se hacen sensibles: el derecho de todos a ver el cielo, el ahorro energético, la captación y distribución de la energía solar – la ciudad se considera entonces como fuente de energía, y ya no solamente como lugar de consumo –, el control del impacto mutuo entre la ciudad y la atmósfera.

Con este último tema, nos encontramos frente a lo que los físicos llaman un “problema multiescala”; es decir: un mismo fenómeno, como el de la isla de calor, es el producto de innumerables contribuciones, las cuales se han de estudiar conjuntamente y de forma simultánea a escalas tan distintas que ya no las gobiernan las mismas ecuaciones. Habrá que aprender a construir edificios pensando en la ciudad, ciudades pensando en el territorio, y concebir el mismo territorio a partir de las ciudades, cuyos buenos o malos procedimientos modelan hasta los campos más distantes, y el planeta entero.

Abstract

By their continuous transformations along the day and the year, Sun and sky light are modeling, visually and energetically, the cities and buildings. How this information can be synthesized and used in the project, considering together the random occurrence of the passing clouds and the astronomical regularity of the sun paths?

Regarding to the simulation tools, the main progress in late years has been produced in the render software, that force the users to separate the different components of light in any construction of an

illuminated scene, using the opportune algorithms for direct Sun light, sky aperture, diffuse and specular reflections of Sun and sky.

It will be first shown how the best mode of introducing these components into a design logic consists in taking advantage of the geometrical properties of different projections, as the stereographic, equivalent, orthographic, gnomonic or isochronal ones.

It will be also remembered that the apparently simplest problem – Sun paths – conduces the architect to a five dimensions problem. With the example of “Heliodon 2” software, [Beckers & Masset, 2009], it will be shown how to design with the double geometry of Sun paths and sky light.

Due to the growth and necessary densification of our cities, new problems are appearing: the right for everybody to see the sky, the energies economy, the solar energy collect and distribution – cities are then considered as energy sources and not only as consummation places –, the control of the mutual impact between the city and the atmosphere.

With this last theme, we are in front of a “multiscale problem”, as say the physics when a unique problem, as the urban heat island, is the product of innumerable contributions that have to be studied together and simultaneously in so different scales that they are not governed yet by the same equations. We must listen to build architectures thinking on the city, cities thinking on the territory, and to conceive the territory itself from the cities, because our good or bad urban ideas model the most distant countries, and the entire planet.

1. Introducción

La Desde el año 2003, el programa “Heliodon” desarrollado por [Beckers & Masset, 2009], ha sido concebido con el fin de ayudar los arquitectos a controlar mejor las aportaciones térmicas y visuales de la luz natural en cada etapa de sus proyectos, desde los primeros esbozos hasta las comprobaciones finales. Este programa ha sido utilizado por varios centenares de arquitectos (Barcelona, América latina), y, más recientemente, por decenas de ingenieros especializados en temas urbanos (Compiègne) o medioambientales (Montreal).

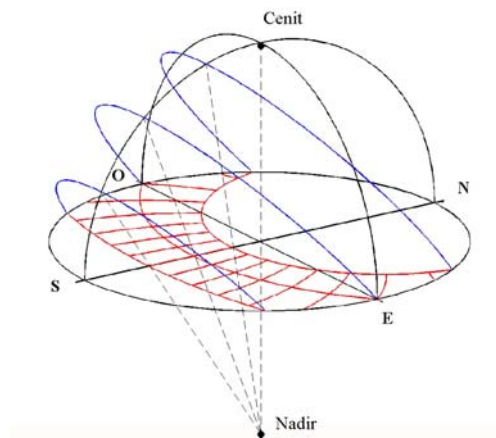
Resulta particularmente eficaz utilizarlo juntamente con programas comerciales de renderización, pues estos aportan al usuario, en complemento, la obligación de separar los componentes de la iluminación (luz directa del sol, luz difusa del cielo, reflexiones difusas y especulares), de apreciar los algoritmos subyacentes (trazado de rayos para los componentes directos y especulares, radiosidad para los componentes difusos), de especificar las propiedades ópticas de los materiales ideados y, finalmente, de adecuar las imágenes resultantes a la experiencia visual. Como lo confirma su evolución reciente, tales programas serán tanto más efectivos cuánto se limiten a la síntesis de imágenes, pues los cálculos propios a la luminotecnia resultan poco convincentes en el proyecto, aportando una falsa caución científica, ya que, en realidad, nunca se pueden conseguir datos meteorológicos y ópticos con una precisión suficiente, y tampoco existen casos medidos suficientemente desarrollados como para servir de referencias.

Por lo tanto, como lo mostraremos aquí, resulta necesario y suficiente, para cualquier proyecto, confiar exclusivamente en el razonamiento geométrico y en el aprecio final del ojo, considerando todo lo demás de forma meramente cualitativa.

2. La radiación solar

El diagrama solar consiste tradicionalmente en una estereografía de los trayectos solares previamente dibujados sobre la bóveda celeste, (fig. 1). La estereografía es una proyección central sobre el plano del suelo desde el nadir (punto diametralmente opuesto al cenit de la bóveda); sus propiedades geométricas ofrecen tres ventajas sobre las otras proyecciones azimutales: es conforme (respeta los ángulos), conserva los círculos y mantiene los elementos cercanos al horizonte con una dimensión apreciable en el diagrama resultante.

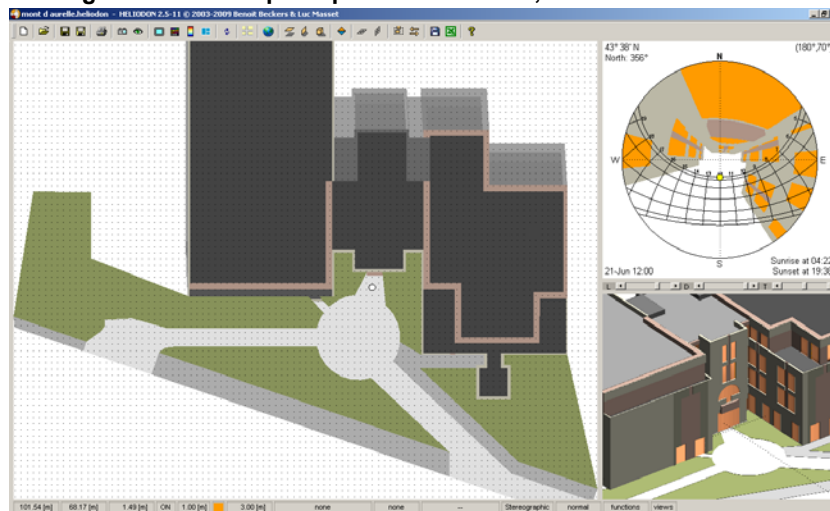
Figura 1. Hemisferio local, trayectos solares y proyección estereográfica



Tras proyectar del mismo modo los objetos de una escena en el diagrama, donde aparecen como máscaras (u obstrucciones), este se aprecia como un calendario, mostrando los trayectos solares parcialmente enmascarados por los objetos de la escena, lo cual significa que, en los momentos correspondientes del día y del año, los rayos solares no alcanzan el punto considerado. Por lo tanto, el diagrama solar informa de todas las obstrucciones que se dan en un punto de la escena (el *captor*).

En "Heliodon", este diagrama se presenta juntamente con una planta sombreada, (fig. 2). Ambas representaciones son perfectamente complementarias, ya que la primera es puntual, pero muestra todo el año, mientras que la segunda es instantánea (las sombras corresponden a un instante preciso), pero muestra todo el espacio. Una tercera ventana ofrece una axonometría de la escena, que añade la dimensión vertical.

Figura 2. Pantalla principal de "Heliodon", con las tres ventanas

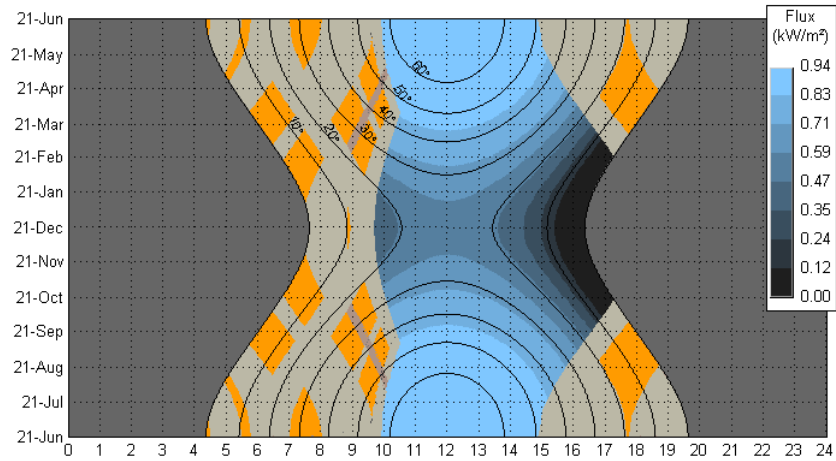


Cuando el captor se desplaza en la planta, el diagrama solar se modifica. Cuando el sol se desplaza en la estereografía (modificándose la hora y/o el día), las sombras se mueven en la planta. Gracias a este proceso interactivo, el usuario se desplaza libremente en el espacio y en el tiempo, es decir en las cinco dimensiones del problema solar (las tres espaciales, más las horas y los días). Con ello, adquiere una información global sobre la situación que ningún gráfico le podría dar por sí solo.

Para integrar la radiación recibida en un intervalo de tiempo, resulta práctico modificar la estereografía, de modo a hacer equidistantes los días y los meses en sus ejes respectivos; la proyección resultante, invento de los autores del programa [Beckers 2007], fue llamada *isócrona*, es decir: "que progresa a pasos

temporales constantes” (fig. 3). En este gráfico, se observa también el flujo solar (en kW/m^2), que depende del espesor de la capa de atmósfera atravesada y, por lo tanto, de la latitud, de la altitud y de la altura solar.

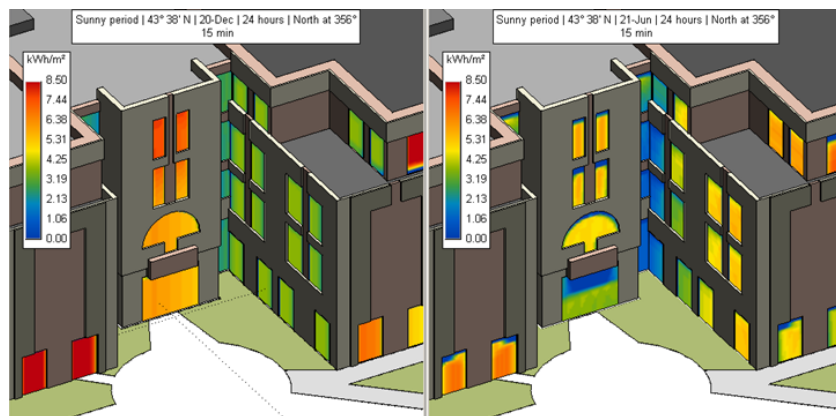
Figura 3. Proyección isócrona, con sobreimpresión del flujo solar



Para poder realizar un balance estacional o anual de la radiación recibida por cada superficie de la escena, es imprescindible tomar en cuenta los intervalos nublados, cuando el Sol desaparece parcialmente o totalmente. En la actualidad, y pese a los numerosos trabajos realizados al respecto, [Badesku 2008] no existen datos medidos fiables (los satélites aún no pueden evaluar correctamente las nubes bajas, y las mediciones terrestres son demasiado incompletas). Los modelos teóricos tampoco resultan satisfactorios.

En el uso de Heliodon, considerándose imprescindible mantener la universalidad del programa, para todos los climas y latitudes donde trabajan sus usuarios, sólo sería aceptable un modelo sencillo y robusto, que pueda adaptarse a cada tipo de datos atmosféricos disponibles, posiblemente a partir de una aproximación drástica, como la de Angström [Şen 2004], que propone una relación lineal (controvertida) entre las horas de asoleo efectivo y la radiación total recibida. Sin embargo, la efectividad de tal cálculo adicional no es evidente para el proyecto de arquitectura, donde, generalmente, basta ampliamente con poder comparar las condiciones extremas de ambos solsticios (invierno y verano).

Figura 4. Irradiación solar en las ventanas en los solsticios de invierno y de verano



Al final de un proyecto, una imagen como la figura 4 deja claro que se ha conseguido favorecer la entrada del sol por las ventanas en invierno, protegiendo las mismas en verano (se observa que, salvo en algunas ventanas laterales, la radiación entrante es mayor en invierno que en verano). Idealmente, este tipo de imagen no es más que la síntesis del proceso proyectual, donde sólo el uso interactivo de las vistas

espaciales y de la estereografía permite diseñar con un control simultáneo en el tiempo y el espacio de la incidencia de cada decisión sobre las condiciones de asoleo.

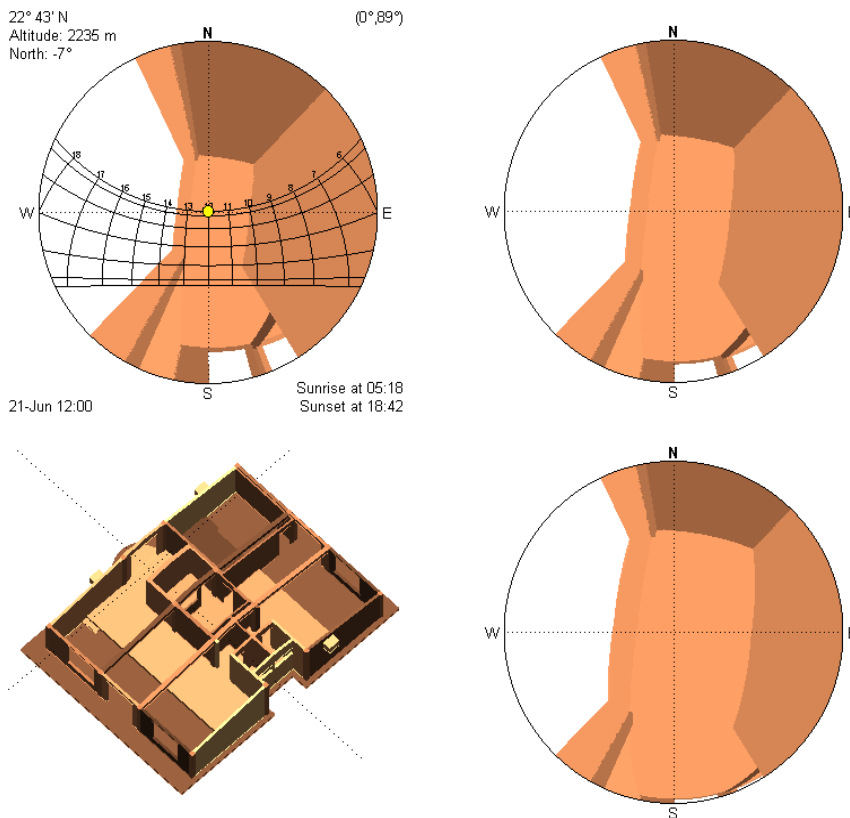
3. La luz del cielo

En el proyecto de arquitectura, es importante considerar también la obertura de cada espacio interior hacia el cielo, y la posibilidad consiguiente de captar su luz difusa, siempre benéfica (en los días nublados, por ser la única luz natural disponible, e incluso en los días soleados de verano, por calentar menos que cualquier fuente de luz artificial, siempre que el Sol no entre directamente). En la mayoría de los climas, un buen diseño consistirá en controlar el acceso directo del Sol y, al mismo tiempo, permitir una entrada importante del cielo.

La proyección *equivalente* [Lambert 1760] permite obtener directamente el *factor de cielo*, es decir el porcentaje de cielo visible desde cualquier punto de la escena (fig.5). La proyección ortogonal permite obtener directamente (analogía de Nusselt [Nusselt 1928]) el *factor de vista del cielo* (en inglés: "sky view factor", SVF), que sería un primer paso para el cálculo de la radiosidad (para obtener un balance completo del equilibrio radiativo, haría falta calcular no solamente los factores de vista del cielo, sino también los factores de vista de cada par de superficies de la escena entre sí, y así sucesivamente para considerar las reflexiones difusas múltiples).

El factor de vista del cielo depende de la orientación de la superficie donde se calcula, e interviene directamente en el cálculo del intercambio radiativo entre el cielo y esta superficie. Así, suponiendo un cielo nublado con una iluminancia de 20 000 luxes y una superficie de trabajo con un SFV de, por ejemplo, 1%, deducimos que, por iluminación directa del cielo, esta superficie recibiría 200 luxes. De hecho, con asegurar que todas las superficies de trabajo de un interior tengan un mínimo de unos 2-3% de SFV, podremos asegurar que no hará falta nunca prender la luz artificial en pleno día.

Figura 5. Proyecciones estereográfica, equivalente (SF= 28.8 %) y ortogonal (SVF = 25.1)



El factor de cielo es un simple ángulo sólido, que no está atado a ninguna superficie. En cualquier parte del volumen interior, indicará el porcentaje de cielo visible. Su promedio dentro de este volumen da un valor de referencia que puede servir para comparaciones, por ejemplo entre dos soluciones arquitectónicas diferentes, o en un mismo interior, antes y después de la construcción de un edificio que modifique el entorno (estudio de impacto).

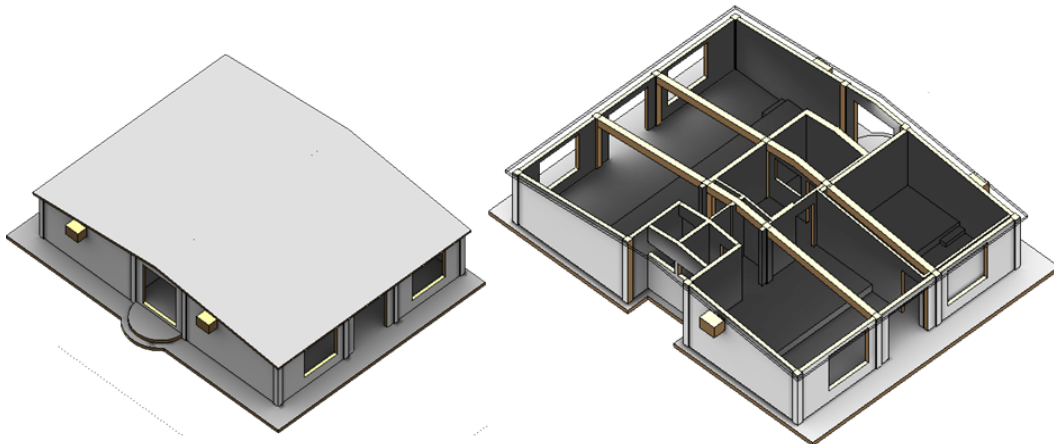
Con él, por ejemplo, es posible diseñar un pabellón que ofrezca la misma obertura hacia el cielo que la catedral de Chartres o que cualquier edificio moderno que el usuario tome como referencia. En este sentido, se trata de un verdadero parámetro de diseño, el más sencillo, pero ya muy efectivo.

En comparación, el *factor de luz del día*, más conocido por los arquitectos [Bouvier 1988], presenta serias deficiencias. Su definición es muy sencilla: corresponde a la diferencia de nivel de iluminación entre el interior estudiado y el exterior despejado. Tal definición es un acierto perceptivo, ya que nuestra visión es siempre relativa y procede por comparaciones. Así, un interior claro será siempre observado como tal, aunque se encuentre en un momento dado muy oscurecido por hallarse el cielo nublado, porque somos más sensibles a las diferencias que a los valores absolutos.

El factor de luz del día resulta por lo tanto ser un excelente parámetro de observación, que basta para describir globalmente una configuración dada. Es, además, muy fácil de medir. No obstante, su definición encierra una serie de dificultades muy serias que imposibilitan su correcta simulación y su uso en el diseño. En primer lugar, sus inventores han tenido que definir unas condiciones precisas de cielo nublado, y quitar la iluminación solar directa de su evaluación. Tal proceder no nos molesta, en nuestro afán asumido de estudiar los componentes de la iluminación por separado, pero contradice totalmente su pretensión a ser un parámetro global. En segundo lugar, todas las fórmulas propuestas (existen muchos programas libres para calcularlo, ya que interviene en la normativa de varios países, como Francia) son empíricas, y no permiten un cálculo de error. Además, implican especificar los factores de reflexión de todas las superficies de la escena. Al principio de un proyecto, es poco probable que estos factores se conozcan. Tampoco se ha mostrado nunca que un razonamiento basado en este parámetro haya conducido con rigor a la elección de las pinturas y de los revestimientos. Ahora bien, un parámetro que necesita más información de la necesaria, y a destiempo, no puede pretender acompañar el desarrollo de un proyecto.

En conclusión, vemos que una serie de parámetros límpidos y fáciles de simular (la cantidad total de radiación solar directa en ambos solsticios considerados despejados más, según el caso, el promedio volumétrico del factor de cielo o la distribución espacial del factor de vista del cielo) resulta ofrecer una información más segura, coherente y útil para el proyecto que un parámetro supuestamente global, pero que no pasa de ofrecernos dudosas fórmulas empíricas finalmente inservibles...

Figura 6. Con todas sus superficies coloreadas por el SFV, este edificio parece una imagen renderizada bajo la luz difusa de un cielo totalmente nublado



4. Parámetros de observación

Las mismas dificultades se repiten cada vez que la arquitectura se busca algún parámetro para guiar sus proyectos con respecto a determinado fenómeno sensible.

Así, la acústica moderna empezó con la definición de la *reverberación*, un fenómeno fácil de observar (se trata de la tardanza en desaparecer de un sonido emitido en cualquier recinto cerrado por superficies reflectoras), fácil de medir (desde el invento de los altavoces y de los micrófonos) y con evidentes consecuencias en la calidad acústica de cualquier arquitectura, dependiendo de su uso (así, un aula con excesiva reverberación cansa el oído y limita la comprensión del habla, mientras que una sala de concierto desprovista de reverberación parece muerta y perjudica tanto la ejecución musical como la audición).

Tras rellenar progresivamente una sala con materiales absorbentes, y tras observar como la reverberación se reducía progresivamente, Wallace Clement Sabine dedujo una fórmula empírica muy sencilla, que pone en relación el volumen del recinto y la superficie absorbente equivalente. Esta fórmula da buenos resultados en algunas salas, y se vuelve muy mala en otros espacios (por ejemplo: en los recintos rectangulares). Se propusieron luego numerosas otras fórmulas con el fin de corregir este problema, cada vez más complejas, ningunas de las cuales satisfactorias. En efecto, la reverberación depende fuertemente de la geometría y de la distribución de los absorbentes, dos nociones que se han de simplificar forzosamente de forma drástica para obtener una fórmula. Una vez eliminada la geometría, se hace además imposible realizar cualquier cálculo de error. Por si fuera poco, otros parámetros de observación, tan legítimos como la reverberación, han sido propuestos sucesivamente (la *inteligibilidad* del habla, la *claridad* del habla o de la música,...) y todos estos parámetros, a pesar de apuntar hacia el mismo fenómeno (en un espacio muy reverberante, el habla se hace poco claro y poco inteligible, y viceversa), no ofrecen ninguna correlación clara entre sí.

La reverberación resulta por lo tanto ser un parámetro poco fiable para guiar el proyecto de arquitectura. En este caso, resulta mucho más fecundo trabajar con las primeras reflexiones, que ofrecen una información más limitada, pero más fecunda, ya que implican criterios claros, simulaciones fáciles, y una relación inmediata con la geometría por diseñar [Beckers 2005].

Ahora bien, un paralelo se impone entre el factor de luz del día y el tiempo de reverberación: dos parámetros basados en observaciones muy correctas de fenómenos importantes de la percepción, con pretensiones globalizantes (tras Sabine, se proyectaron muchas salas, principalmente en los Estados Unidos, cuya acústica se basaba exclusivamente en la reverberación, produciéndose graves fenómenos de focalización, por la presencia recurrentes de unas bóvedas muy útiles para aumentar el volumen, pero finalmente perjudiciales, por razones que la reverberación ignora), y que conducen a fórmulas empíricas cuyo manejo en el proyecto resulta más que discutible.

Por ello, algunos autores [Ng 2003], si bien se interesan al factor de luz del día, se dan cuenta de la dificultad de su uso y finalmente proponen coeficientes de tipo factor de cielo afirmando al final que son muy útiles para diseñar edificios en lugares de gran densidad como Hongkong.

Un problema de misma índole se vislumbra, en la escala urbana, con la reciente promoción del efecto de *isla térmica*. Se trata otra vez de una observación tan sencilla como pertinaz: en el centro de las grandes ciudades, la temperatura suele ser bastante más alta que en el exterior. Para tratar de este fenómeno, de sus posibles consecuencias nefastas y de las soluciones pertinentes, se ha definido la isla de calor (en inglés: "urban heat island", UHI) como la diferencia de temperatura nocturna entre la ciudad y el campo.

En principio, se puede medir fácilmente. Sin embargo, algunos autores se preocupan de saber cómo se definen esas dos entidades [Stewart & Oke, 2009] y proponen de clasificar mejor, previamente, las distintas zonas entre centro de ciudad y diferentes tipos de campos. Otros, como [Unger 2009], proponen mediciones más generales como el factor de cielo y alcanzan a mostrar hasta cierto punto que el factor de cielo está relacionado con la diferencia de temperatura.

En resumen, están surgiendo muchas ideas interesantes, críticas de los métodos utilizados en los últimos años, muy poco rigurosos con respecto a las escalas temporales y espaciales.

5. Parámetros de diseño

Desde el año 2008, según la ONU, la mitad de la humanidad vive en ciudades, y todos los especialistas prevén que el ritmo de la urbanización seguirá muy fuerte (actualmente, hay cinco millones de nuevos urbanos cada mes), hasta que se alcance, por lo menos, el 70% [UN report 2008]. Es poco arriesgado afirmar que el gran problema del siglo será la ciudad, su falta de atractivo en los países ricos, su crecimiento descontrolado en los países pobres, y, en todos los casos, su excesiva extensión, que priva poco a poco la humanidad de sus mejores tierras agrícolas. La necesaria solución, una fuerte densificación del espacio urbano, reducirá lógicamente, entre otras consecuencias, la porción de Sol y cielo concedida a cada habitante...

Los estudios de la radiación solar a escala urbana son incipientes, y no han producido hasta la fecha ningún resultado revolucionario. Sin embargo, cinco problemas deberían recibir una atención particular en los próximos años. Para salvar las dificultades planteadas por los parámetros de observación antes mencionados, y encontrar los pertinentes parámetros de diseño (es decir: de ayuda a la decisión, tanto para los arquitectos y urbanistas como para los líderes políticos), será necesario, una vez más, separar los diferentes componentes de la luz. En efecto, no intervienen todos a la vez y, por lo tanto, sería ilusorio buscar un parámetro global y único, que permitiría resolverlo todo de una vez. También hay que rechazar aquí las ideas tradicionales del urbanismo (con sus parámetros de densidad, compacidad,...), muy elegantes, ciertamente discriminantes entre las ciudades, pero sin vínculo claro con la física [Adolphe 2001].

El primer problema es el del balance térmico pasivo, que depende esencialmente de la radiación solar directa. Según el clima y la época en que cada superficie recibe la radiación, ésta es benéfica o no. Un modelo robusto de la nubosidad es necesario, para obtener balances estacionales (quizás un promedio diario para cada mes) que permitan identificar y corregir las zonas más desfavorables, o comparar entre sí diferentes propuestas de planificación urbana.

El segundo problema es el de la ciudad como fuente de energía (en este caso: térmica y fotovoltaica), que incita a identificar las zonas ideales para disponer los paneles (techos correctamente inclinados, porciones poco obstruidas de las fachadas,...). En cuanto a los paneles térmicos, basta estudiar la radiación solar directa; la proximidad al lugar de consumo es un factor importante. En cuanto a los paneles fotovoltaicos, la luz del cielo y la luz reflejada deben ser consideradas (y, por lo tanto, el índice de reflexión de las superficies próximas); la proximidad al lugar de consumo no importa directamente, pero puede significar, por el autoabastecimiento resultante, un ahorro ostensible, mediante la reducción de la red de distribución eléctrica; el problema de las obstrucciones es complejo, ya que un conjunto de células fotovoltaicas no reacciona de forma lineal a un sombreado parcial y temporal [Woyte 2003].

El tercer problema es el del ahorro en el alumbrado público y privado. Sería relativamente fácil deducir, para cada calle, en función de su orientación y ancho, así como de la altura y del color de las fachadas lindantes, cuándo la iluminación de la calzada pasa por debajo de un cierto nivel, que justifique el encendido del alumbrado público. Para simular el consumo dentro de los edificios, haría falta, primero, conocer el porcentaje de acristalamiento de las fachadas, el uso de los locales (vivienda, despachos o comercio), y hacerse una idea de los hábitos de los usuarios. En los edificios públicos, sistemas automatizados pueden cerrar las cortinas para impedir la entrada directa del Sol. La importancia del diseño interior (tabiques, colores dominantes,...), que no depende desde luego del urbanista, parece difícil de evaluar.

El cuarto problema es el del derecho para todos a disfrutar de un pedazo de cielo. Se trata ya de un criterio de bienestar, el más fácil de simular (los promedios de factor de vista del cielo sobre las fachadas deberían permitir comparaciones fundadas y discriminantes entre ciudades, entre los barrios de una misma ciudad, entre las calles de un mismo barrio,... [Capeluto 2005]

El quinto problema, y el más complejo, es el de la interacción entre ciudad y atmósfera. Las grandes ciudades actuales no sólo reciben el influjo de las condiciones atmosféricas, sino que inciden sobre éstas: modifican los vientos, emiten poluciones (que reducen, a su vez, la radiación solar incidente) y, ya que las superficies construidas cubren actualmente casi el 3% del planeta, pueden tener una influencia no despreciable sobre su albedo.

Los problemas consiguientes, incluidos el que se identifica actualmente como "isla de calor", intervienen simultáneamente en la escala *macro* (territorial, la de los climatólogos), *meso* (urbana) y *micro* (arquitectónica), como causa y consecuencia de muchas decisiones individuales. Una evaluación correcta de cada decisión (por ejemplo: cuál es el balance global de una norma que impone paneles térmicos en toda nueva construcción) necesita por lo tanto trabajar simultáneamente en las tres escalas.

Ahora bien, el cambio de escala, incluso considerando un mismo fenómeno físico, implica generalmente un cambio de modelo físico. Así, en el caso de la radiación solar, los climatólogos proponen un parámetro de *rugosidad* [Martilli 2003], advirtiendo que una ciudad no responde como ninguna superficie lisa, incluso a la mayor escala, la que ilustran las fotografías en infrarrojo por satélite. Necesitan luego un modelo de la ciudad muy simplificado, pero que no evacue esta rugosidad, es decir: la tercera dimensión.

En la escala urbana, se impone el modelo físico del balance radiativo, pero habrá que buscar una alternativa a la resolución demasiado lenta de la ecuación completa de radiación (probablemente, mediante técnicas de tipo *Nivel de detalle* o *LOD: Level Of Detail* [Ripolles 2008]).

En la escala arquitectónica, los métodos de proyección (es decir: la reducción de todo el problema a un punto, con la necesaria interactividad) son los más productivos, los únicos capaces de ofrecer y de manipular los parámetros de diseño convenientes.

Los problemas resultantes pertenecen luego propiamente a la física multiescala, cuya prometedora aplicación a los espacios urbanos aún no ha empezado. De hecho, la dificultad principal reside, actualmente, en la ausencia de modelos 3D idóneos para trabajar a la escala meso, la del urbanista.

Un modelo útil debería aparecer simplificado al extremo, pero presentando todas las grandes superficies, con su correcta orientación y sin solución de continuidad, así como las superficies de ventanas (según las aplicaciones). No conocemos ningún modelo así, fiable, disponible, y convenientemente actualizado.

6. Conclusiones

Hemos recorrido las tres escalas de la luz en su interacción con las construcciones humanas, desde la arquitectura hacia el territorio. En estos últimos años, varias inquietudes han surgido (los fenómenos de isla de calor, de extensión y densificación urbana, del calentamiento global), impulsando investigaciones originales, por parte de climatólogos, ingenieros y urbanistas.

Hemos mostrado que los dos enfoques extremos – la asistencia al diseño y el análisis de muy grandes modelos urbanos – son en realidad complementarios, compartiendo las mismas exigencias algorítmicas (aceleración de los cálculos, calidad sintética de los gráficos), y que ambos piden una definición muy limpia del modelo físico y de la geometría estudiada, so pena de no poder interpretar los resultados.

En los años venideros, la contribución de los arquitectos y urbanistas será fundamental en dos aspectos, para poder extender el estudio de la radiación solar a las grandes áreas urbanas.

En primer lugar, para concebir modelos 3D de estas áreas correctamente construidos y simplificados, en función del aspecto físico por estudiar.

En segundo lugar, porque los físicos, geógrafos y climatólogos, abandonados a sus preocupaciones, se inclinan naturalmente por los parámetros de observación. Los actores de la escala urbana deberán por lo tanto ilustrar, por su participación y crítica activa, el hecho de que los únicos parámetros válidos son los

que ayudan a la toma de decisión y al diseño, porque la ciudad es una geometría en constante mutación, según las aspiraciones de sus habitantes, con criterios a veces oscuros, otras acertados.

Agradecimientos

Diana Margarita Rodríguez de Santiago, arquitecta, ha realizado los dos modelos 3D aquí utilizados, de un hogar para ancianos en Montpellier (Francia, figuras 2, 3 y 4), y de un pabellón experimental en Zacatecas (México, figuras 5 y 6).

Bibliografía

Adolphe Luc, "A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities", *Environment and Planning B: Planning and Design* 2001, volume 28, pages 183 – 200.

Badesku Viorel, "Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface – Recent Advances", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

Beckers Benoit & Coch Helena, "La acústica diseñada desde su expresión gráfica", Congreso ibérico de acústica "Tecniciacústica", Terrassa, octubre de 2005. *Revista de acústica*, 36 (3-4).

Beckers Benoit, Masset Luc & Beckers Pierre, « Una proyección sintética para el diseño arquitectónico con la luz del sol », 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.

Beckers Benoit & Masset Luc, Heliodon2™, <http://www.heliodon.net>, 2009.

Bouvier François, « Eclairage naturel », Doc. C 3315, *Technique de l'Ingénieur*, 1988.

Capeluto Guedi, Yeziro Abraham, Bleiberg Tamar and Shaviv Edna, "From computer models to simple design tools: Solar rights in the design of urban streets", Ninth International IBPSA Conference Montréal, Canada, August 15-18, 2005.

Lambert Johann Heinrich, *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg, C. Detleffsen for the widow of Eberhard Klett.

Martilli Alberto, Roulet Yves-Alain, Junier Martin, Kirchner Frank, Rotach Mathias, Clappier Alain, "On the impact of urban surface exchange parameterizations on air quality simulations: the Athens case", *Atmospheric Environment* 37 (2003) 4217–4231.

Ng Edward, "Applying computational simulation results to the development of a design method for daylighting design and regulation in high-density cities", Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.

Nusselt Wilhelm, *Graphische bestimmung des winkerverhältnisses bei der wärmestrahlung*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 72(20):673

Ripolles Oscar, Ramos Francisco, Chover Miguel, Gumbau Jesus & Quiros Ricardo, « A Tool for the Creation and management of level-of-detail models for 3D applications », *WSEAS Transactions on Computers*, Issue 7, Volume 7, July 2008, 1020-1029.

Şen Zekai, « Solar energy in progress and future research trends » *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004) 367–416.

Stewart Iain, Oke Tim, "Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer", Eighth Symposium on the Urban Environment, 2009.

Unger János, "Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database", *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 36, Nos. 1/2/3, 2009.

UN Report, *State of the World's Cities 2008/2009 - Harmonious Cities*, UN Habitat, 2008.

Woyte Achim, Nijs Johan & Belmans Ronnie, « Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: Literature review and field test results », *Solar Energy* 74(3), 217-233, 2003.