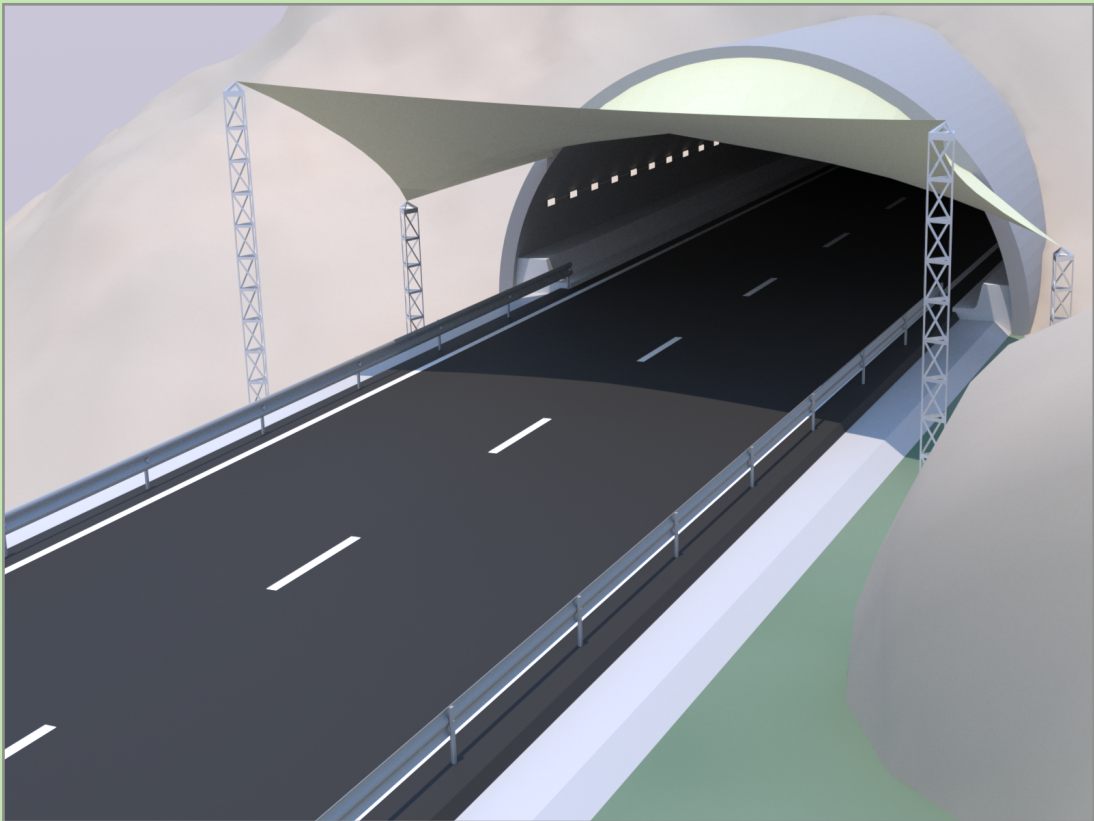


TESIS DOCTORAL

---

**OPTIMIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE ESTRUCTURAS  
TENSADAS EN TÚNELES MEDIANTE TÉCNICAS DE DISEÑO  
ASISTIDO POR ORDENADOR**

---



**ROBERTO GARCÍA ESCRIBANO**  
GRANADA 2011

UNIVERSIDAD DE GRANADA



**OPTIMIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE ESTRUCTURAS  
TENSADAS EN TÚNELES MEDIANTE TÉCNICAS DE DISEÑO  
ASISTIDO POR ORDENADOR**

**MEMORIA**

que para optar al Grado de Doctor

presenta

**ROBERTO GARCÍA ESCRIBANO**

bajo la dirección de:

por orden alfabético

**Dra. Luisa María Gil Martín**

**Dr. Antonio Manuel Peña García**

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Roberto García Escribano  
D.L.: GR 1127-2012  
ISBN: 978-84-695-1035-3

# OPTIMIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE ESTRUCTURAS TENSADAS EN TÚNELES MEDIANTE TÉCNICAS DE DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR

Directores de la Tesis

Fdo.: Dr. Antonio Manuel Peña García  
Ayudante Doctor  
Dpto. Ingeniería Civil  
Universidad de Granada

Fdo.: Dra. Luisa María Gil Martín  
Titular de Universidad  
Dpto. de Mecánica de Estructuras e  
Ingeniería Hidráulica  
Universidad de Granada

Trabajo presentado para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Granada.

Fdo.: Roberto García Escribano



El Dr. Antonio Manuel Peña García del Departamento de Ingeniería Civil y la Dra. Luisa María Gil Martín del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, ambos de la Universidad de Granada.

CERTIFICAN:

Que el trabajo de investigación que se recoge en la presente Memoria, titulada "OPTIMIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE ESTRUCTURAS TENSADAS EN TÚNELES MEDIANTE TÉCNICAS DE DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR" presentada por D. Roberto García Escribano para optar al grado de Doctor por la Universidad de Granada, ha sido realizado en su totalidad bajo nuestra dirección.

Fdo.: Dr. Antonio Manuel Peña García  
Ayudante Doctor  
Dpto. Ingeniería Civil  
Universidad de Granada

Fdo.: Dra. Luisa María Gil Martín  
Titular de Universidad  
Dpto. de Mecánica de Estructuras e  
Ingeniería Hidráulica  
Universidad de Granada

# Indice

<b>1. Resumen .....</b>	<b>1</b>
Esquema general del trabajo .....	5
<b>2. Introducción: La problemática de la iluminación en túneles.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Fundamento Teórico .....</b>	<b>12</b>
3.1. Estructuras tensadas .....	13
3.1.1. Materiales textiles .....	14
3.1.2. Métodos de análisis .....	16
3.1.3. Empleo de las estructuras tensadas para el aprovechamiento de la luz solar: la ecuación ESTS. .	18
3.2. Imagen sintética.....	20
3.2.1. Render .....	22
3.2.2. Evolución de la imagen sintética .....	23
3.2.3. Imagen sintética basada en el Método Monte Carlo .	37
3.2.4. Luxrender.....	41
3.2.5. Esquema general de la imagen sintética .....	42
<b>4. Objetivos .....</b>	<b>43</b>
<b>5. Resultados .....</b>	<b>45</b>
5.1. Virtualización .....	46
5.1.1. Virtualización del modelo a escala .....	46
5.1.2. Virtualización del Foco Vitalux .....	47
5.1.3. Ajustes del programa.....	50
5.2. Calibración del modelo digital .....	54
5.2.1. Generación del modelo de iluminación.....	56
5.3. Simulación.....	68
5.3.1. Iluminación.....	68

5.3.2. Materiales Textiles .....	69
5.3.3. Estructuras Tensadas .....	73
5.4. Renderización de imágenes y toma de medidas .....	74
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>84</b>
<b>7. Publicaciones y Comunicaciones generadas por la tesis.....</b>	<b>87</b>
7.1. A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving.....	88
7.2. (En revisión) "Computational Optimization of Semi-transparent Tension Structures for the use of Solar Light in Road Tunnel" .....	89
7.3. ICREPQ´11 "A computational method to optimize energy savings of tension structures set in road tunnels".....	90
7.4. ICREPQ´12 "Computational Simulation versus Scale Model to determine the Optimal Shape of Tension Structures for the use of Sunlight in Road Tunnels".....	91
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>92</b>

# Resumen

La iluminación de los túneles, es uno de los problemas más complejos de resolver en Luminotecnia [1,2]. Además de la dificultad para implementar soluciones precisas que garanticen la correcta visibilidad en el interior de los mismos, tarea compleja debido a la alta variabilidad entre la percepción de los distintos conductores, el consumo energético del alumbrado de los túneles, especialmente durante el día, es muy alto ya que es necesario un sistema de iluminación que garantice que no se produzca un cambio abrupto en los niveles de iluminación al entrar en ellos cuando se viene de un ambiente muy luminoso.

En trabajos anteriores [3,4], se ha demostrado que el uso de estructuras tensadas semitransparentes en la entrada de los túneles es útil para desplazar la llamada zona umbral, que es en la que se produce un mayor consumo energético, de modo que se puede aprovechar la luz del sol durante el día.



*Figura 1.* Estructura tensada en la entrada de un paso subterráneo.

Sin embargo, los avances anteriores se llevaron a cabo con estructuras tensadas muy simples ya que el objetivo principal era probar solamente si eran fiables y rentables.

Por otra parte, cualquier intento de optimizar y demostrar la eficacia de estas estructuras debería llevarse a cabo en túneles reales, lo que implica además de los riesgos inherentes para la seguridad vial, elevadas inversiones tanto económicas como en recursos humanos y trámites burocráticos.

Por tanto, la búsqueda de una herramienta eficaz para optimizar las estructuras y el ahorro energético en condiciones reales sin tener que ir a las pruebas de campo se convirtió en el principal objetivo de esta línea de investigación. Una herramienta que pueda determinar qué estructura tensada es mejor para cada túnel y que permita obtener el compromiso óptimo entre el ahorro de energía, los niveles de iluminación y las propiedades mecánicas de la estructura en sí para cada túnel.

Para lograr este objetivo, es necesario señalar que el óptimo sistema de iluminación para un determinado túnel y, por tanto los niveles de iluminación necesario, depende de las condiciones de tráfico permitidas dentro del mismo (velocidad máxima permitida, número de sentidos de circulación etc.) y de la orientación del mismo con respecto a la eclíptica solar, CIE Publ. 88 [5]. Esto significa que la estructura tensada de cada túnel requiere de una prueba específica, lo que es claramente irrealizable.

La herramienta necesaria para nuestro propósito se basa en un método computacional no empleado hasta el momento que simula tanto el túnel como la estructura, el sol y su eclíptica, sin generar residuos materiales ni pruebas peligrosas. Para obtener la estructura óptima, en cada túnel, comenzamos por definir los puntos fijos de la estructura y se genera su forma de equilibrio. Esto se hace mediante algoritmos propios basados en mallado en topología que generan un listado de puntos que definen la malla. Después se crean los patrones para construir esta estructura y si salen muy complicados, lo que repercutiría en un incremento en el coste final de construcción, se deshecha la estructura y se vuelven a definir los puntos fijos la búsqueda de la forma de equilibrio y generación de un nuevo patronaje. Una vez que el resultado es correcto y viable, el listado de puntos es exportado mediante coordenadas cartesianas XYZ al

programa Blender 3D. En este en el programa se establecen la coordenadas geográficas del túnel (latitud y longitud) y se orienta el mismo con respecto al norte geográfico.

Con la geometría correctamente posicionada se comienzan a establecer los valores lumínicos para el sol. Para ello se introduce la fecha y la hora a la que se desea realizar la simulación. Gracias a un módulo propio del programa, estos valores se convierten en los ángulos del sol con respecto a la horizontal y a la vertical. Igualmente se introducen valores que simulan la atmósfera, como pueden ser partículas en suspensión y cantidad de ozono. Estos valores afectan a la claridad y al color de la iluminación solar.

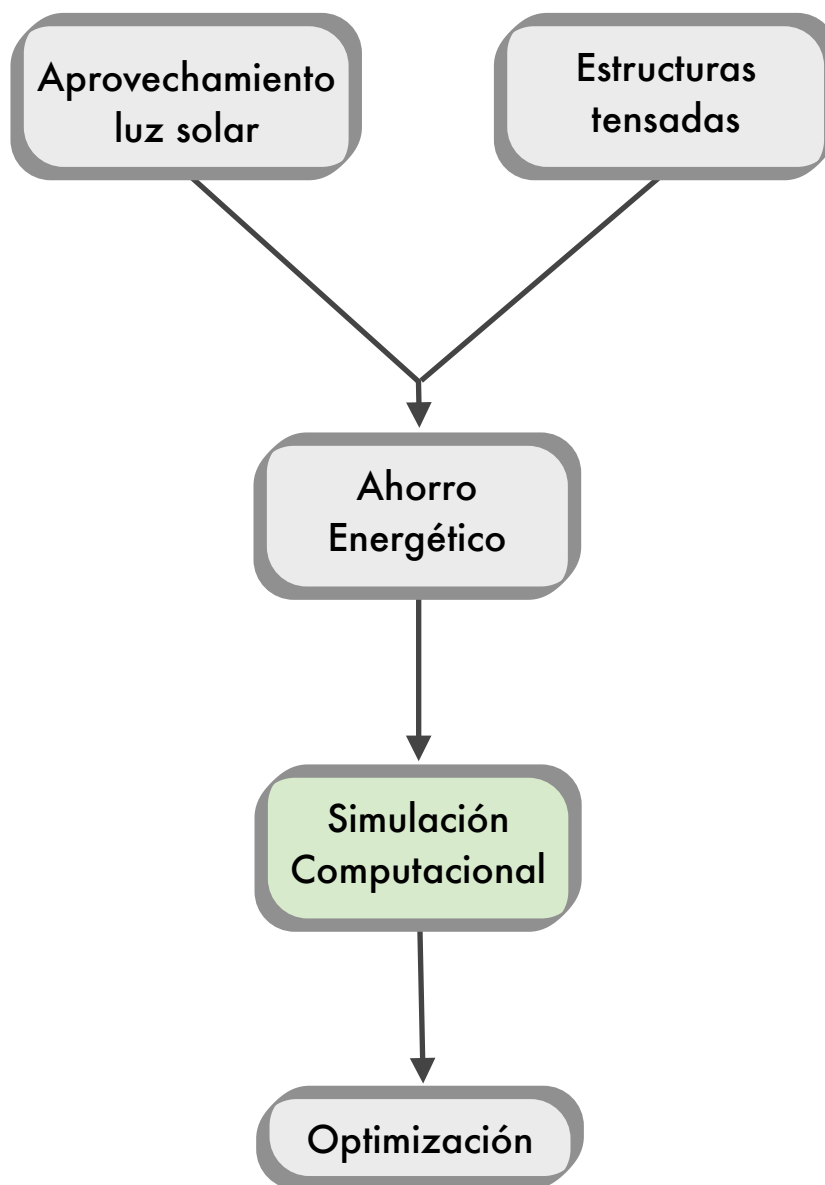
El siguiente paso es generar materiales digitales para cada uno de los materiales reales que se quieren simular, en sus definiciones se incluyen valores de transmitancia obtenidos en el laboratorio, en el caso de las telas, valores del índice de refracción para el aire y de este modo, para cada uno de los objetos de la escena, se crea su equivalente virtual.

Una vez tenemos la escena completa se obtiene una imagen sobre la que a posteriori se pueden medir los valores de iluminación que existen sobre la superficie de la calzada, pudiendo de esta manera optimizar el diseño de la estructura y ajustarlo a las normas existentes sobre iluminación en túneles.

Se han hecho simulaciones para 3 formas diferentes, cada una de las cuales ha sido combinada con 3 tipos de materiales. Estos resultados computacionales se han comparado con los obtenidos sobre el modelo a escala de un túnel capaz de reproducir cualquier posición relativa respecto a la eclíptica solar, obteniendo muy buena concordancia entre los resultados.



## Esquema general del trabajo



# **Introducción: La problemática de la iluminación en túneles**

Tanto túneles como pasos subterráneos requieren altos niveles de iluminación con el objeto de garantizar la seguridad de sus usuarios. Uno de los problemas al proyectar un túnel es el diseño de la iluminación, cuyo objetivo principal es ayudar a los conductores a detectar la presencia de objetos, quietos o en movimiento frente a ellos. Existen varios factores que pueden influir en el proceso de diseño de la iluminación de un túnel: las condiciones de la vía, la intensidad y la velocidad del tráfico, la longitud del túnel, su orientación, los alrededores del mismo, etc.

El diseño de la iluminación puede ser relativamente fácil para las condiciones nocturnas, sin embargo se vuelve más complejo en condiciones diurnas, porque el tiempo necesario para la adaptación visual cuando se pasa de un entorno de luminoso a la oscuridad del túnel es más largo durante el día.

### Zonificación lumínica de los túneles

Con el fin de obtener una adaptación progresiva, la iluminación en los túneles se divide en varias zonas y cada una de ellas, requiere de diferente longitud y niveles de iluminación.

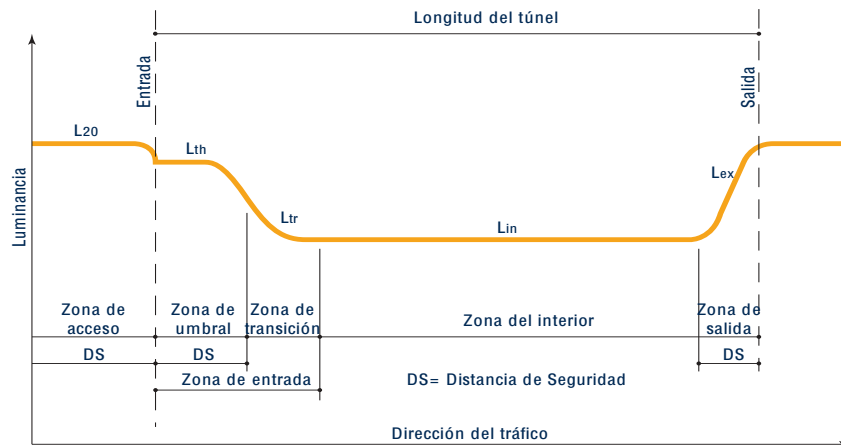


Figura 2. Zonificación lumínica de los túneles

Estas zonas, representadas en la *Figura 2*, son:

- **Zona de acceso:** la zona de acceso es la parte de la carretera, a cielo abierto, situada inmediatamente anterior a la entrada o portal del túnel. Esta zona ha de cubrir la distancia a la que un conductor que se aproxima es capaz de ver en el interior del túnel. Para esta zona se recomienda que su longitud sea la distancia de seguridad *SD*. Definida como la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo que circula a determinada velocidad, pueda detenerse antes de alcanzar a un obstáculo situado en la calzada, de acuerdo con CIE Publ. 88 (2004), esta distancia se expresa mediante la siguiente *Formula 1*.

$$SD = vt_0 + \frac{v^2}{2g(f \pm s)} \quad (1)$$

*Formula 1.* Distancia de Seguridad

Donde  $v$  es la velocidad del vehículo,  $t_0$  es el tiempo de reacción (que puede ser considerado aproximadamente como un segundo),  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $f$  el coeficiente de fricción, que depende de las condiciones atmosférica (carretera seca o húmeda) y  $s$  la tangente de la pendiente de la carretera en grados (positiva para subidas y negativa para bajadas).

Para un conductor en la zona de acceso, cuanto mayor es la velocidad de su vehículo más larga es la distancia desde la boca del túnel hacia el interior en la que el conductor tiene que ver el interior del túnel, lo que supone mayor longitud de la zona umbral a iluminar.

- **Zona Umbral:** esta es la zona más importante para la iluminación del túnel y se extiende desde la entrada o portal del túnel hacia su interior. Es recomendable que su longitud tenga por lo menos la distancia de seguridad, *SD* dada por la *Formula 1*. Para un determinado túnel, la luminancia en la calzada en la primera mitad de la zona umbral será  $L_{th}$ , es

decir, el valor al inicio de la zona umbral, manteniéndose constante, mientras que en la segunda mitad de esta zona, disminuye gradualmente hasta a  $0.4 \times L_{th}$ . Los niveles de luminancia en la zona de umbral son los más significativos, porque un conductor ha de adaptarse de un ambiente muy luminoso en la entrada a la oscuridad relativa dentro del túnel. La luminancia en la primera parte de la zona umbral  $L_{th}$ , es el parámetro más importante en el diseño de la iluminación de un túnel de carretera por dos razones:

- $L_{th}$  es el valor de referencia para las siguientes zonas.
- Es, con diferencia, el mayor valor de luminancia en todo el túnel, por lo que cualquier forma de lograr reducir el valor de  $L_{th}$ , significará un importante ahorro energético en iluminación eléctrica, sobre todo si tenemos en cuenta que la iluminación de los túneles funciona de forma continua.
- **Zona de transición:** es la situada a continuación de la zona umbral. El nivel de luminancia disminuye progresivamente a partir de  $0.4 \times L_{th}$  hasta la luminancia en la zona interior  $L_{in}$ , con el fin de permitir la adaptación visual a las condiciones de iluminación de la zona interior.
- **Zona del interior:** se extiende desde el final de la zona de transición hasta la zona de salida del túnel. La luminancia en esta zona  $L_{in}$ , es la más baja de todo el túnel, porque los receptores de la retina ya se han adaptado a los niveles de luminancia del interior del túnel. El valor de  $L_{in}$  depende a su vez del límite de velocidad, la longitud del túnel y la intensidad de tráfico.
- **Zona de salida:** es la zona final del túnel y en ella la influencia de la iluminación exterior es importante. En esta zona, el ojo del conductor tiene que adaptarse a los niveles de luminosidad exterior con el fin de evitar el deslumbramiento.

Los niveles de luminancia requeridos en cada zona del túnel se resumen en la *Tabla 1*.

Zona		Luminancia
Umbral	1ª mitad	$L_{th}$
Umbral	2ª mitad	Disminución gradual hasta $0.4 L_{th}$
Transición		Disminución gradual hasta $0.14 L_{th}$
Interior		1-10 (cd/m <sup>2</sup> )
Salida		$5 L_{in}$

*Tabla 1.* Ratio entre luminancias en las diferentes zonas del túnel

Las consideraciones anteriores nos ayudan a entender el porque del diseño de la iluminación de un túnel. Los elementos utilizados para la iluminación (lámparas, luminarias, etc) deben ser diseñados con precisión para nuestro propósito y pueden ser muy diferentes dependiendo de las características particulares del propio túnel.

En relación a las luminarias y lámparas, hay varias posibilidades:

- Luminarias con lámparas de sodio de alta presión, que ofrecen un buen compromiso entre reproducción cromática y rendimiento energético.
- Lámparas fluorescentes tubulares compactas, con control electrónico para reducir el consumo de energía, son cada vez más frecuentes.
- Luminarias con lámparas de sodio de baja presión que siguen siendo aún utilizadas debido a su bajo consumo.

También, es importante que las paredes del túnel estén bien iluminadas hasta una cierta altura, se recomiendan por lo general 2 m, ya que esto ayuda a la discriminación de los objetos en el interior del túnel.

Para diseñar y proyectar la instalación de alumbrado de un túnel los ingenieros necesitan conocer el valor máximo de luminancia ( $\text{cd}/\text{m}^2$  - candelas por metro cuadrado) que estadísticamente representa al entorno del túnel en cuestión. Existen varios métodos de aproximación para estimar la luminancia en el acceso de los túneles. Métodos LSEQ y L20 son los más utilizadas y ambos se explican en CIE Publ. 88 (2004). En este trabajo se ha usado el método de L20 ya que es el más preciso en cuanto a la obtención del valor para  $L_{th}$  según se ha demostrado recientemente [6].

En definitiva, el desmesurado consumo energético reclama soluciones urgentes que, garantizando la seguridad vial, nos permitan túneles más sostenibles e independientes de la energía eléctrica. En este sentido, en los últimos años se ha enfocado la resolución de este problema de varias maneras, destacando el desplazamiento de la zona umbral fuera del túnel mediante el uso de estructuras tensadas semitransparentes.

La primera parte de la siguiente sección presentará los principios básicos de las estructuras tensadas, mientras que la segunda parte se centrará en los fundamentos de la herramienta que se ha empleado para optimizarlos en este trabajo.

# Fundamento Teórico

Al tratarse de un trabajo multidisciplinar en el que se emplearán métodos computacionales para optimizar estructuras tensadas, a continuación se expondrá brevemente el Fundamento teórico y estado del arte de ambas áreas.



## Estructuras tensadas

No es algo nuevo en el diseño de túneles la incorporación de protectores solares, galerías u otros dispositivos similares, mediante los cuales la luz del día se utiliza para crear un nivel intermedio entre la iluminación exterior y la interior del túnel, Simons y Bean [7]. La importante desventaja del uso de protectores solares o galerías, es la acumulación de nieve y suciedad que puede crear problemas de mantenimiento y/o reducción de su eficacia, así como comprometer las capacidades mecánicas de los mismos.

Estos problemas pueden ser eliminados con estructuras tensadas, ya que las superficies horizontales pueden ser eliminadas mediante la modificación del diseño. El uso de material textil y estructuras ligeras ya ha generado espectaculares formas para varios tipos de aplicaciones. Además, el desarrollo constante de nuevos materiales ha generado más garantías de durabilidad de dichas estructuras, que han pasado de temporales o desmontables a estructuras estables y duraderas. Las nuevas superficies lacadas facilitan la limpieza y el mantenimiento, así como aseguran la protección contra incendios. Utilizando teflón anti adherente o superficies lisas, la estructura se limpia cada vez que llueve y por lo tanto no es necesaria una limpieza adicional, por lo que la estructura está prácticamente libre de mantenimiento. Además, la geometría específica de la estructura que se extiende en la entrada del túnel permite evitar el goteo de agua y la acumulación de nieve sobre la carretera.

Desde el punto de vista de la iluminación, la forma de la estructura tiene que ser capaz de evitar la luz difusa que entra por los lados aumentando el nivel de luminancia de manera incontrolada. Dada la versatilidad de las estructuras textiles, estas pueden ser diseñadas con el objetivo adicional de la máxima integración en el paisaje, minimizando así el impacto visual. Otra de las ventajas de la colocación de una estructura en la entrada del túnel es que reduce el cambio brusco en el color de la luz que se percibe entre el exterior y en el interior. Bajo la estructura, el color de la luz es una mezcla entre el color de la luz del sol filtrado a través de la

lona y el color de las luminarias de sodio de baja presión utilizadas en el interior del túnel.

El uso de estructuras tensadas está cada vez más extendido debido a su ligereza, sencillez y versatilidad, que les otorga un especial atractivo frente a otros tipos de soluciones estructurales rígidas. Su versatilidad hace que las estructuras tensadas se puedan encontrar en la mayoría de las zonas climáticas de la tierra, permitiendo crear espacios confortables, servir de protección contra el sol, lluvia, viento o nieve y permitiendo a la vez, la reducción del consumo energético, Chilton y Blum [8].

### **Materiales textiles**

El alto índice de transmitancia de las telas tensadas, les confiere unas cualidades lumínicas muy interesantes. La transmitancia de los tejidos varía entre el 10% y el 40%. Este nivel puede ajustarse mediante la utilización de pigmentos o recubrimientos especiales sobre las mismas.

La mayoría de las estructuras están compuestas de tejido real en lugar de mallas o películas. Normalmente, el tejido es revestido y laminado con materiales sintéticos para una mayor durabilidad y resistencia ambiental.

Para la fabricación podemos encontrar en el mercado entre otros los siguientes materiales:

- Fibra de poliéster recubierta de PVC. Este tipo de material es el más empleado y menos costoso en las estructuras tensadas. Se utiliza para estructuras permanentes, siendo su vida útil de 15 a 20 años.
- Fibra de vidrio recubierta de PTFE (teflón®). Su uso está también extendido para estructuras permanentes, siendo su vida de unos 30 años. Se considera no combustible. Los niveles de transmitancia pueden llegar al 25%. Se ha de manipular con cuidado, evitando doblarlo. Esta fibra ha

sido utilizada en proyectos de gran envergadura como el Georgia Dome, el aeropuerto de Denver o el Millenium Dome de la *Figura 3*.



*Figura 3.* Millenium Dome, Londres.

- Fibra de vidrio recubierta de Silicona. Este recubrimiento es más flexible que el teflón por lo que es más sencilla su manipulación y transporte. Su transmitancia varía del 25% al 40%. El uso de la silicona como recubrimiento ocasionaba en sus comienzos problemas de unión entre las telas, se considera un recubrimiento que puede atraer la suciedad.
- Fibra de aramida (Kevlar), recubierta de PVC, PTFE o silicona. Dada su gran resistencia, se utiliza para aplicaciones especiales. Tiene poca resistencia a UV por lo que hay que protegerla, disminuyendo su transmitancia. Se ha utilizado recubierta de PVC en la cubierta del estadio Olímpico de Montreal, por las elevadas tensiones que ha de soportar debido a las cargas de nieve *Figura 4*.



*Figura 4.* Estadio Olímpico, Montreal.

### **Métodos de análisis**

Los métodos de análisis de estructuras tensadas comienzan su desarrollo en la segunda mitad del siglo XX. Frei Otto fue uno de los pioneros de este tipo de estructuras, de hecho, a principios de los años 60 ya había construido numerosas estructuras tensadas y al finalizar su tesis en el MIT en 1962 realizó numerosas publicaciones sobre diseño y cálculo de estructuras tensadas, Otto 1967 [9].

Day, en 1965 [10] introdujo el método de relajación dinámica para el análisis de estructuras tensadas que más tarde, fue revisado y ampliado Barnes [11], Wakefield [12]. A finales de los 60 y comienzos de los 70 se desarrollaron los primeros análisis de estructuras tensadas mediante técnicas computacionales como indican los trabajos de Day y Bunce [13].

El método de densidades de fuerza (FDM) fue presentado inicialmente por Linkwitz y Schek [14]. Este método se basa en las relaciones de longitud-fuerza, denominada densidades de fuerza, que se definen para cada dirección del mallado. Schek [15] mostró que el método de densidades de fuerza es muy

adecuado para conseguir la forma de equilibrio de la estructura o form-finding. El FDM supuso una gran mejora sobre los métodos de mallado anteriormente existentes en la búsqueda de la forma de equilibrio.

En FDM la forma de equilibrio y la distribución de la tensión son incógnitas. Haber [16] y Abel [17] presentaron el "concepto de suavizado", que permite al diseñador resolver la forma de la configuración de referencia asumiendo una distribución de pretensado. En el uso de este método, las ecuaciones de equilibrio no son lineales, y por lo tanto es necesario el empleo de técnicas iterativas para su resolución.

Un buen ejemplo del uso actual de métodos lineales se puede ver en Levy y Spiller [18]. Estos autores utilizan el FDM y el método de la cuadrícula con un enfoque práctico y sencillo para el diseño a través del uso del análisis geométrico y no lineal.

Otros métodos de búsqueda de la forma de equilibrio se basan en el análisis dinámico. Una revisión reciente es presentada por Barnes [19], uno de los principales contribuyentes a estos métodos. En esta revisión se describen los procedimientos numéricos basados en el método de relajación dinámica, con amortiguación cinética para encontrar la forma.

Una nueva técnica para el mallado de las estructuras tensadas ha sido desarrollada por Hernández-Montes [20]. Este nuevo procedimiento se basa en la topología. El método topológico de mallado, aprovecha una característica importante del método de densidad de fuerza (FDM), gracias al cual no es necesario conocer la posición inicial de los nodos de la estructura que no son fijos. Por tanto, conociendo únicamente la ubicación de los puntos fijos y la conectividad de los nodos se puede desarrollar un mallado que permita obtener la configuración de equilibrio de la estructura. La ventaja de éste método es que al basarse en topología, a diferencia de los métodos de asignación utilizados hasta ahora y basados exclusivamente en geometría, no es necesaria una estimación

inicial de la forma de equilibrio como paso previo al proceso de obtención del form-finding.

Este método ha sido implementado en el mediante los algoritmos usados en la determinación de la forma de equilibrio de las estructuras analizadas en el presente trabajo. Gracias a este método de análisis se consigue una mayor agilidad en la obtención de la estructura para cada caso, optimizando de esta manera el proceso de diseño.

### **Empleo de las estructuras tensadas para el aprovechamiento de la luz solar: la ecuación ESTS.**

Hasta ahora se han expuesto los aspectos mecánicos de las estructuras tensadas y se ha puesto de manifiesto que estas estructuras pueden permitir el aprovechamiento de la luz solar cuando se emplean para desplazar la zona umbral de un túnel dado. En esta sección se presenta la principal herramienta para cuantificar este ahorro: La ecuación ESTS.

De la definición de iluminancia el flujo total en la zona umbral sin la estructura tensada puede ser obtenido mediante la siguiente expresión [21]:

$$\Phi_t = \frac{E_m d l_t}{2}, \quad (2)$$

Donde  $\Phi_t$  es el flujo luminoso total,  $E_m$  es la media de la luminancia,  $d$  es la anchura del túnel, y  $l_t$  es la longitud de la zona umbral. En nuestro caso como la zona umbral está desplazada por medio de la estructura tensada, (2) se convierte en.

$$\Phi_{t-S} = \frac{(1-S)E_m d l_S}{2} + \frac{E_m d (l_t - l_S)}{2}, \quad (3)$$

Donde  $\Phi_{t-S}$  es el flujo luminoso en toda la zona umbral, incluida la parte bajo la estructura tensada, es decir  $l_S$  es la longitud de la estructura tensada, y  $S$  el

cociente entre la iluminancia producida sobre la carretera bajo la estructura tensada y aquella que pide la norma .

Calculando la relación entre los flujos obtenidos con (2) y (3) se pueden comparar diferentes modelos de estructuras tensadas.

$$\frac{\Phi_{t-s}}{\Phi_t} = 1 - S \frac{l_s}{l_t}. \quad (4)$$

El consumo energético de cualquier luminaria se define como

$$P = \frac{\Phi}{\eta}, \quad (5)$$

Donde  $\Phi$  es el flujo luminoso emitido por la luminaria y  $\eta$  es el rendimiento. Teniendo en cuenta que el consumo es la energía consumida por unidad de tiempo, (4) llegamos a la expresión.

$$\frac{Q_{t-s}}{Q_t} = 1 - S \frac{l_s}{l_t}, \quad (6)$$

Donde  $Q_{t-s}$  es la energía consumida en la zona umbral desplazada por la estructura tensada y  $Q_t$  es la energía consumida en la misma zona si no existiera la estructura tensada.

La gran ventaja de esta ecuación (6) es que permite comparar en términos de ahorro energético cualesquiera estructuras (no solo tensadas) que desplacen la zona umbral de un túnel dado cualesquiera que sean su longitud, material y orientación. Esto es así porque la ecuación proporciona el cociente entre la energía eléctrica que consume el alumbrado de la zona umbral en caso de que se desplace, entre el consumo de la zona umbral si no se desplazase.

## Imagen sintética

Si observamos las imágenes obtenidas por ordenador nos daremos cuenta de que cada vez es más difícil distinguir la realidad de la ficción. El avance en la representación gráfica se debe en gran medida al auge que las imágenes sintéticas tiene en el mundo del cine y la televisión. Este auge se ve apoyado por el interés económico que el mundo del entretenimiento tiene, haciendo de la industria de la imagen por ordenador un negocio que a su vez permite la existencia de investigación y desarrollo de nuevas y más eficientes herramientas de generación de imágenes. El coste de producción de imágenes fotorrealistas se ha ido reduciendo de manera gradual en los últimos años y la publicación de los avances computacionales en la red y en revistas especializadas ha hecho posible la incorporación de nuevos procedimientos y algoritmos por gran parte de la comunidad gráfica. Este cambio y abaratamiento de los medios ha propiciado que proyectos que sólo estaban al alcance de grandes productoras de cine sean ahora acometidos por pequeños estudios, que en su mayor parte se mueven en el campo de la publicidad.



No obstante, hay que dejar constancia de que antes de llegar al momento actual el camino recorrido ha sido largo y han sido muchas las barreras a superar .

Los inicios de la imagen sintética podrían situarse en la creación de Sketchpad, un sistema gráfico creado mucho antes de que el término interfaz gráfica fuera concebido. Ivan Sutherland desarrolló “Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communications System” en 1963 para su tesis doctoral en el MIT [22]. En este trabajo se diseñó un sistema que permitía a los usuarios dibujar puntos, segmentos de líneas y arcos directamente sobre la pantalla mediante el lápiz de luz. No se trataba solamente del primer programa de dibujo desarrollado en la historia de la informática sino también, de un programa absolutamente avanzado a su tiempo.

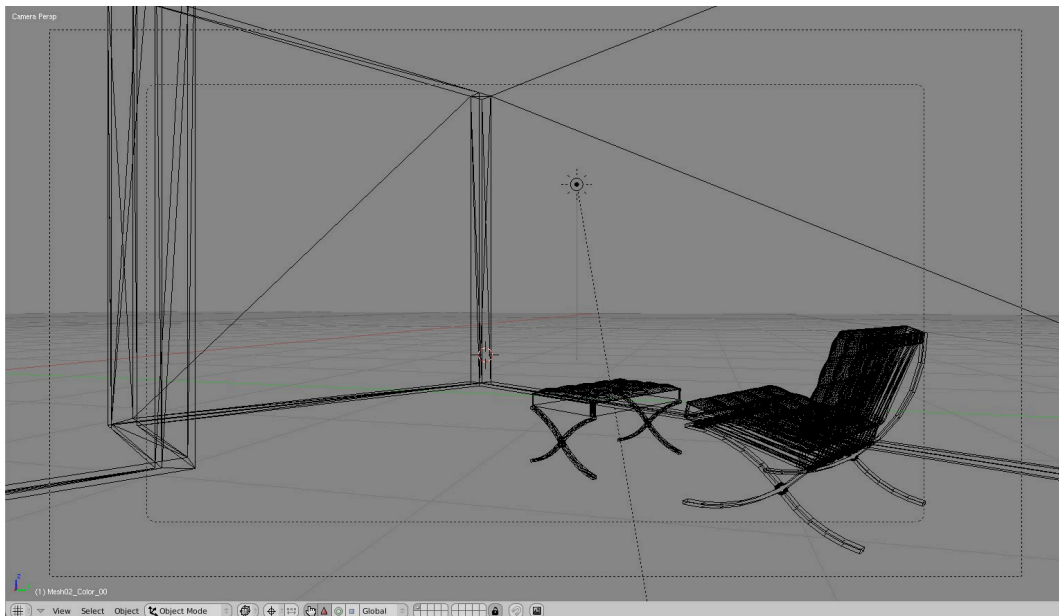


*Figura 5.* Sketchpad.

## Render

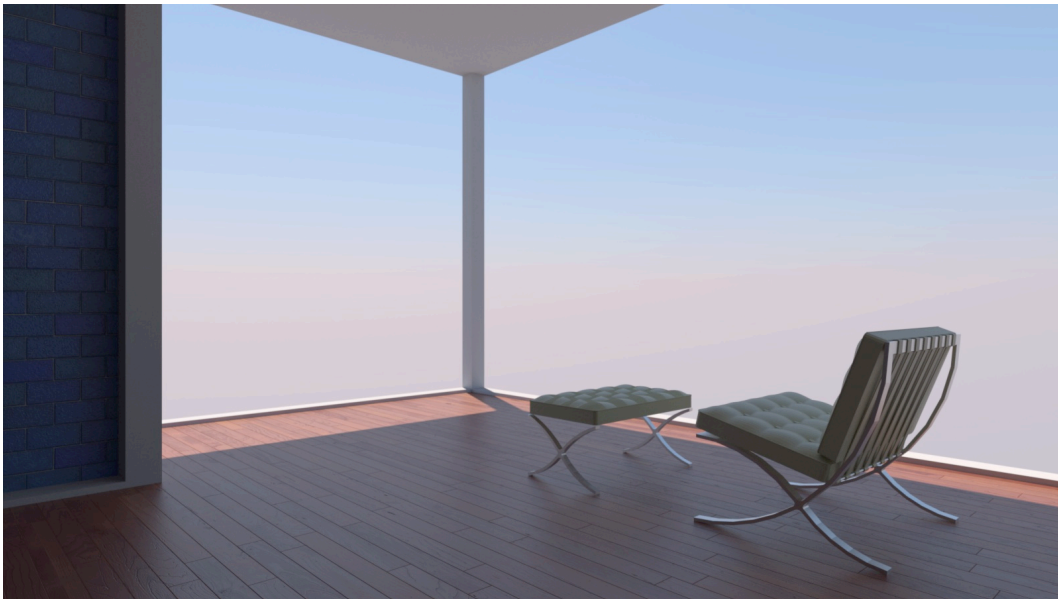
El render es el proceso de generación de una imagen en dos dimensiones a partir de uno o varios modelos que conforman una escena por medio de programas de ordenador.

Una escena contiene objetos definidos mediante un lenguaje en el que se especifica la geometría de los mismos y las texturas o pieles que los cubren, aportando la diferenciación entre las características de unos materiales y otros. También se define el punto de vista o cámara con la que se va a “mirar” la escena. Y por supuesto la iluminación que hará visibles el resto de parámetros.



*Figura 6.* Escena 3D.

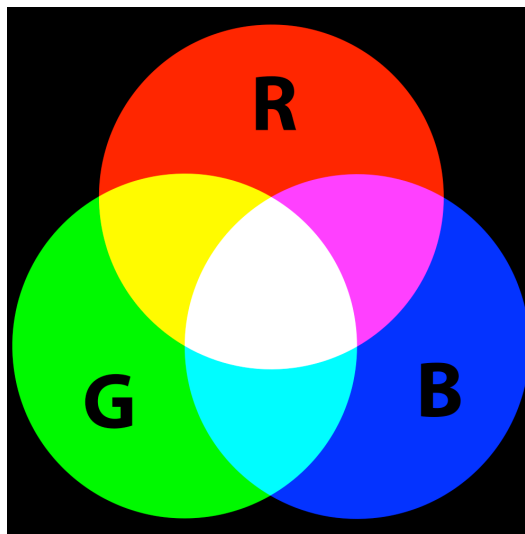
Los datos contenidos en el archivo de escena se pasan a un programa de procesamiento para obtener una imagen digital equivalente a la que obtendríamos con una cámara fotográfica en el mundo real.



*Figura 7.* Render basado en la física.

### **Evolución de la imagen sintética**

Uno de los aspectos más importantes de la infografía, entendiendo ésta como la creación de imágenes que tratan de imitar el mundo real mediante el uso del ordenador, es la simulación de la iluminación de la escena. Las imágenes generadas por ordenador son matrices de puntos formadas por valores RGB (síntesis aditiva basada en la luz) que indican la cantidad de cada uno de los colores primarios que contiene cada punto o pixel. Para ello, los programas de procesamiento basan sus cálculos en los objetos, sus propiedades superficiales y cómo la luz que ilumina la escena interactúa con ellos.



*Figura 8.* Síntesis aditiva de colores.

Obtener estos valores no es un cálculo en absoluto trivial. Además, hay que tener en cuenta que la iluminación de la escena no es solo aquella que procede directamente de las fuentes de luz sino que indirectamente depende de las reflexiones en todas y cada una de las superficies que la componen.

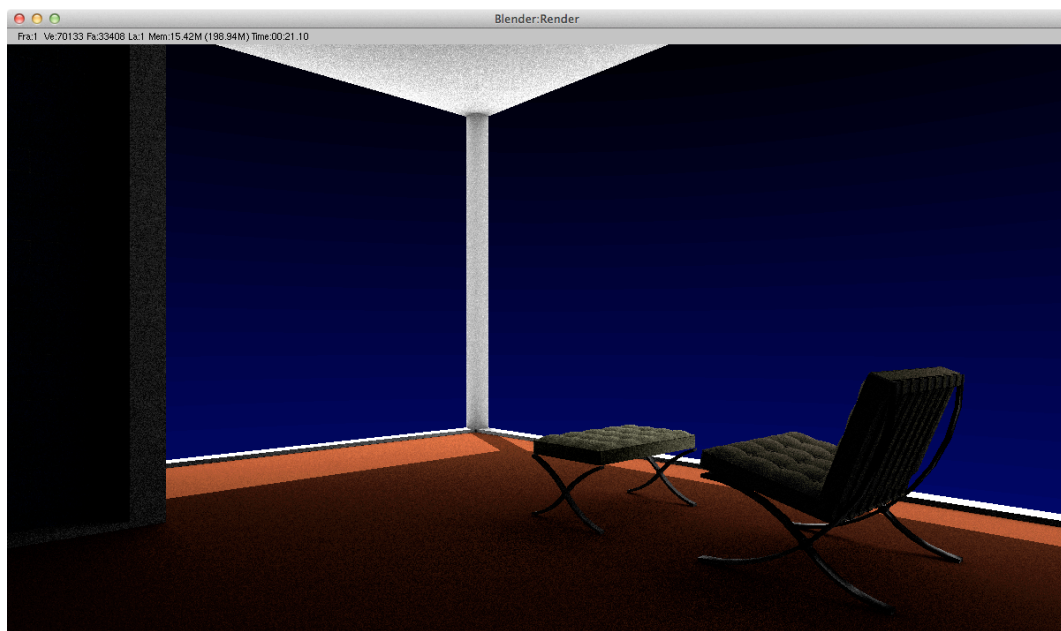
La complejidad de la iluminación en diseño gráfico, que normalmente pasa desapercibida a los profanos en materia de iluminación y computación, es compleja, y ha de ser traducida al entorno virtual mediante cálculos computacionales que se aproximen a los resultados que se obtendrían en la realidad.

En las primeras imágenes obtenidas por ordenador, las reflexiones de la luz en las distintas superficies de la escena no se consideraban. Solo se tenía en cuenta la luz directa que, procedente de las fuentes luminosas, incidía sobre la superficie de cada objeto. Este modelo de iluminación produce resultados en los que los objetos no iluminados directamente aparecen en color negro, como puede observarse en la *Figura 9*.



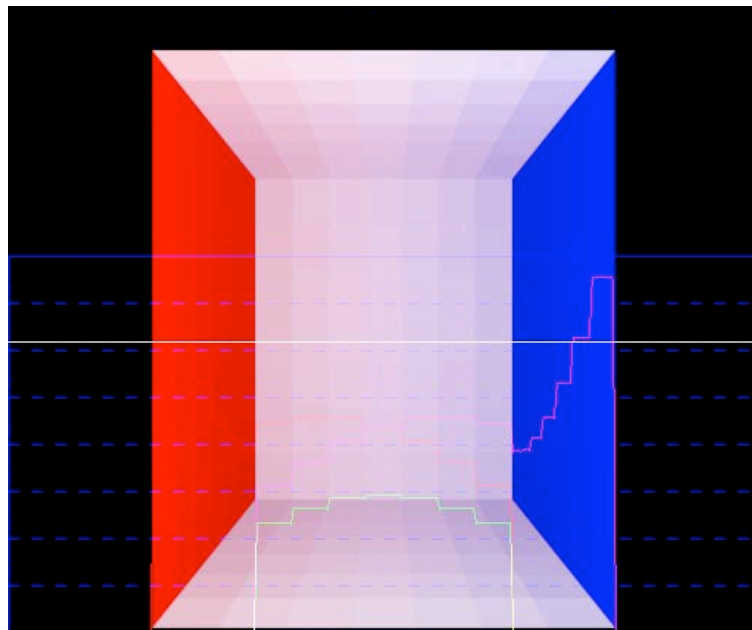
*Figura 9.* Iluminación directa.

Posteriormente se agregó una cierta cantidad de luz ambiente de forma general a la escena. Esta luz era independiente de las superficies adyacentes que existieran no aportando estas ningún nuevo dato a las superficies del entorno, el color de las mismas era despreciado en el calculo, como se muestra en la *Figura 10*.



*Figura 10.* Iluminación Ambiental.

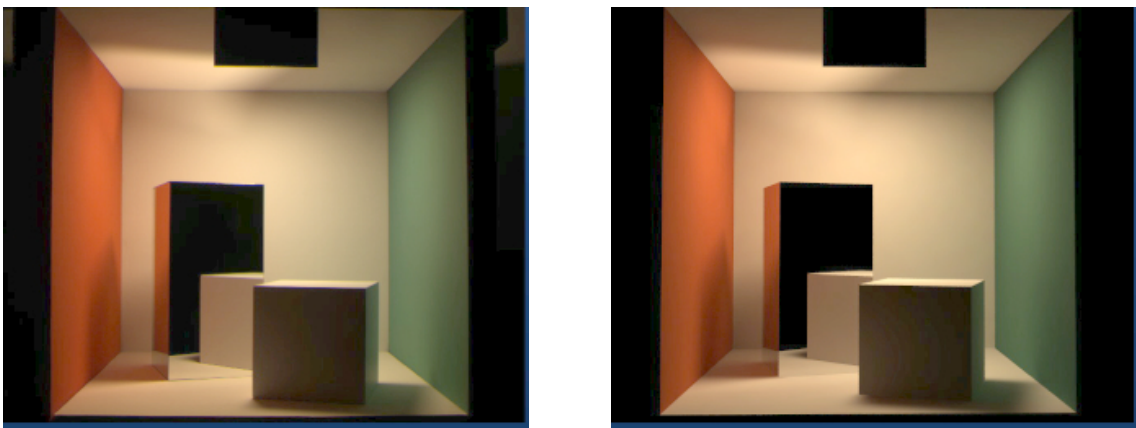
La primera publicación que introduce el uso de iluminación indirecta, y se tienen en cuenta las superficies sobre las que incide la luz es la de Cindy M. Goral en Siggraph 84 [23] donde se describe la forma en la que se había simulado la aparición de los colores rojo y azul de las paredes laterales sobre la superficie blanca de fondo de una caja iluminada por una luz frontal. Para ello se usó la técnica de la radiosidad, basada en la división de cada uno de los planos de pared en una cuadrícula de 7 x 7 parches.



*Figura 11.* Cornell Box.

Se determina el grado de visibilidad de cada uno de los parches con respecto a los otros, teniendo en cuenta que cuanto más lejos está una superficie de otra, menor es el aporte de la luz reflejada por la primera sobre la segunda. De esta manera, se obtiene que el color de cada uno de los parches es igual a la suma de los colores provenientes del resto de los parches de la escena. A pesar de que la iluminación de cada parche depende de la iluminación que llega y rebota en cada uno de ellos, la ecuación de la radiosidad puede resolverse de manera directa como un sistema de ecuaciones lineales.

El resultado obtenido es que la pared de fondo de color blanco recoge el color rojo y azul de las paredes vecinas. Poco después se creó un modelo físico real de la caja y se fotografió con una cámara digital. La configuración exacta se midió a partir de la escena real (espectro de emisión de la fuente de luz, los espectros de reflectancia de las superficies, la posición y el tamaño exactos de todos los objetos, las paredes, la fuente de luz y la cámara) y se encontraron con que las fotografías de la caja puesta al lado de la imagen producida por ordenador eran difícilmente distinguibles. Se había creado la primera imagen fotorrealista.



*Figura 12.* La imagen de la izquierda se ha obtenido a partir de un modelo real fotografiado con una cámara digital. La imagen de la derecha se ha obtenido mediante un render usando los valores físicos de los materiales, luces y condiciones del entorno.

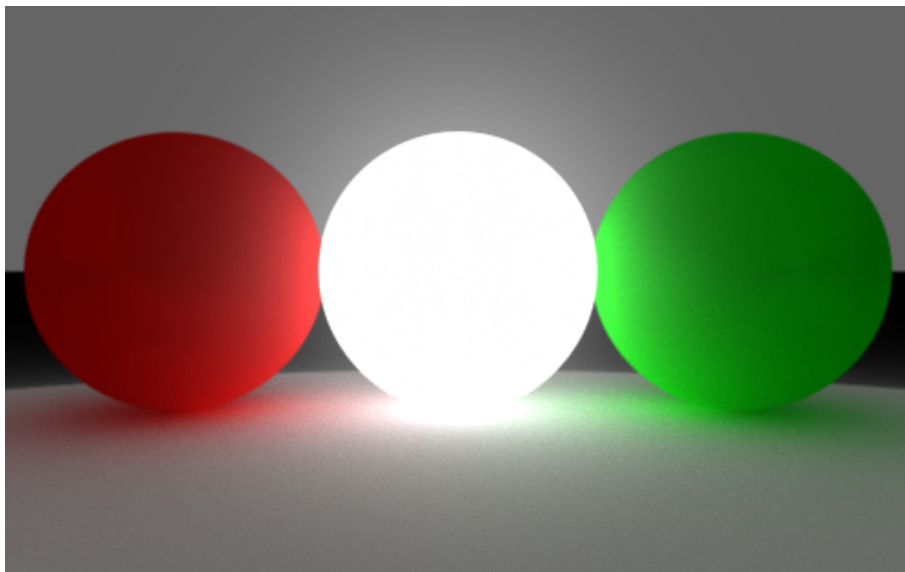
Fuente: <http://www.graphics.cornell.edu/online/box/compare.html>

Una limitación de este trabajo fue que el tiempo necesario para resolver el sistema lineal aumenta con el número de parches en la escena, por lo que la técnica era difícil de utilizar en modelos complejos especialmente si tenemos en cuenta la potencia de cálculo en 1984. Otra limitación es que todas las superficies en el modelo de radiosidad tienen que ser superficies sin brillo.

Posteriormente, T. Kajiyá presentó la "Rendering equation" en Siggraph 86 [24]. En este trabajo se describe en términos generales que la luz que sale de una superficie en cada dirección, es función de la luz que llega desde todas las direcciones, multiplicada por una función que describe cómo la superficie refleja la luz. Esta función, basada en la "Bidirectional Reflectance Distribution Function"

BRDF [25], es constante para las superficies difusas (sin brillo) pero varía dependiendo del ángulo de entrada y salida en las superficies brillantes o satinadas. Kajiya describe un procedimiento para obtener las imágenes llamado "Path tracing". Se trata de la generalización de un trazado de rayos desde la cámara virtual a través de los objetos de la escena por medio de rebotes. La calidad de imagen proporcionada por éste método, suele ser superior a la de las imágenes producidas con los métodos convencionales de representación (Scanline rendering [26], Ray tracing [27]) a costa de unas necesidades de cálculo mucho mayores.

El Path tracing simula muchos efectos que tienen que ser artificialmente añadidos a otros métodos de renderizado, como son la sombras suaves, profundidad de campo, desenfoque de movimiento, cáusticas, oclusión ambiental e iluminación indirecta.

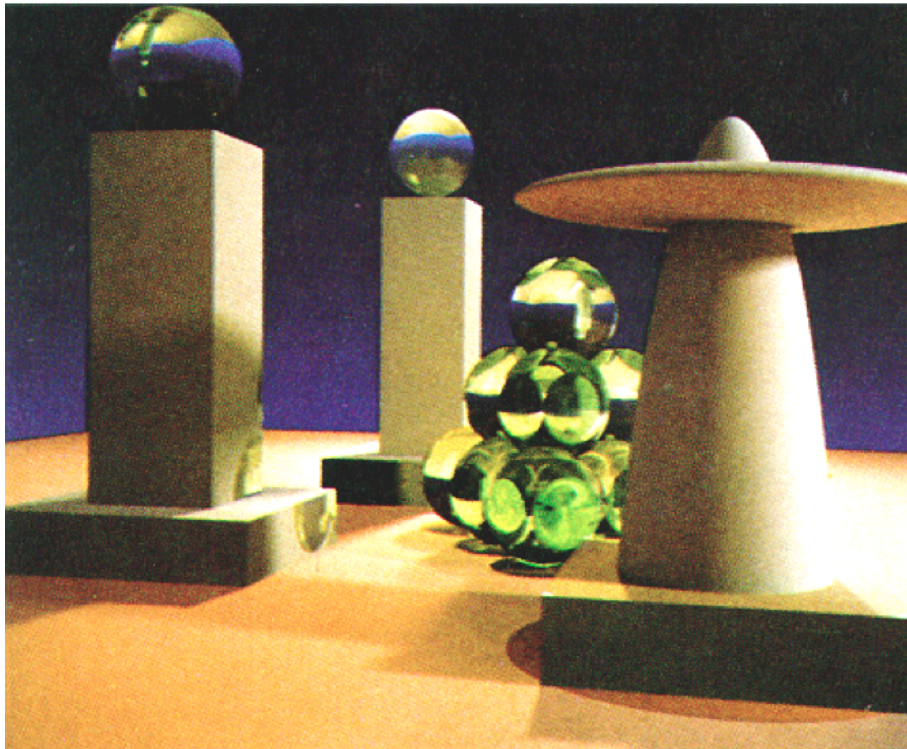


*Figura 13.* Path Tracing, Efectos de iluminación.

Debido a su precisión y naturaleza imparcial (unbiased), se utiliza para generar imágenes de referencia cuando se prueba la calidad de la representación de otros algoritmos, así como cuando lo que se quiere es obtener una imagen lo más fiel a la realidad.



En el artículo publicado por Kajiya se muestra una escena en la que no solo se ven efectos simples de la iluminación, sino que también son tratados efectos complejos como la refracción de la luz a través de los objetos transparentes *Figura 14*. Aunque todavía los cálculos computacionales necesarios para obtener estos efectos eran muy complicados y lentos, se demostró que el problema era manejable tanto conceptualmente como computacionalmente.



*Figura 14.* Efectos de refracción a través de los objetos. Kajiya 1986.

Con el fin de acelerar la convergencia de las imágenes se usan los algoritmos bidireccionales (Bidirectional path tracing) que buscan caminos en ambas direcciones. En la dirección inversa de avance, los rayos se trazan a partir de fuentes de luz hasta que son demasiado tenues como para ser vistos por la cámara. En el sentido contrario, los rayos son trazados desde la cámara hasta que se supera un determinado número de rebotes. Este enfoque se traduce normalmente en una imagen que converge mucho más rápido que usando una sola dirección o Path tracing.

A mediados de la década de 1980 las formas geométricas de las escenas eran ya lo suficientemente avanzadas. Las técnicas de digitalización de objetos del mundo real, mediante el uso de escáner 3D, permitían en pocos segundos transformar objetos y rostros humanos en modelos de polígonos dentro del ordenador.



*Figura 15.* Modelado con scanner 3D.

El siguiente paso consistía en tratar de digitalizar la iluminación real para poder trabajar con ella de forma computacional. El realismo en gráficos por ordenador avanzó de nuevo en la búsqueda de técnicas mediante las cuales se pudiera capturar la iluminación del mundo real y utilizarla para crear la iluminación en las escenas generadas por ordenador. Si se considera un lugar determinado de una escena, la luz en ese lugar se puede describir como el conjunto de todos los colores y las intensidades lumínicas que vienen hacia él desde todas las direcciones. Como resultado, hay un modo relativamente sencillo para capturar esta función para un lugar en el mundo real mediante la digitalización de la imagen procedente de una esfera cromada, que refleja la luz de todo el entorno hacia el cámara *Figura 16*.



*Figura 16.* Esfera cromada. Imagen HDRI de la Basílica de San Pedro.

Otras técnicas para la captura de estas imágenes omnidireccionales incluyen lentes de ojo de pez, panoramas de imágenes unidas, y el escaneo de cámaras panorámicas como puede observarse en la *Figura 17*.



*Figura 17.* Cubo en cruz a partir de la unión de imágenes.



La técnica que utiliza imágenes reales en una escena virtual fue utilizada por primera vez por Miller y Hoffman [28]. Usando esta técnica los objetos generados por ordenador aparecen iluminados por un entorno real con todos sus matices. En realidad, lo que se hace es proyectar la imagen tomada de la realidad sobre la superficie del objeto en cuestión, convirtiendo ésta en una piel o textura *Figura 18*.



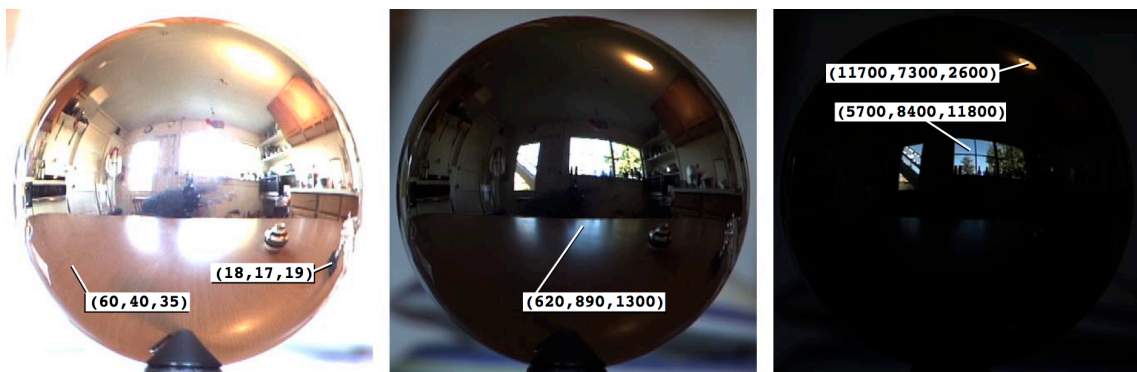
*Figura 18.* Esfera cromada. Imagen HDRI.

Este proceso es conocido como mapeado ambiental y produce imágenes convincentes de los objetos brillantes, pues estos reflejan totalmente su entorno. Sin embargo esta técnica tiene sus limitaciones. Una de las limitaciones del mapeado ambiental es que no puede reproducir los efectos de las sombras propias sobre la luz que reflejan las superficies. La razón de esta limitación es que el entorno de iluminación se aplica directamente a la superficie objeto de acuerdo con la orientación de la superficie, sin importar el grado de visibilidad de cada superficie dentro del entorno.

Una segunda limitación del proceso de mapeado ambiental tradicional es que en una sola fotografía digital o digitalizada de un ambiente, rara vez se captura toda la gama de luz visible en un escena. En una escena típica, las fuentes de luz visibles directamente suelen ser cientos o miles de veces más brillantes que la iluminación del resto de la escena, y ambos tipos de iluminación deben ser capturados para representar la luz con precisión. Este amplio rango dinámico por lo general supera el rango dinámico de las cámaras digitales y de cine, que están

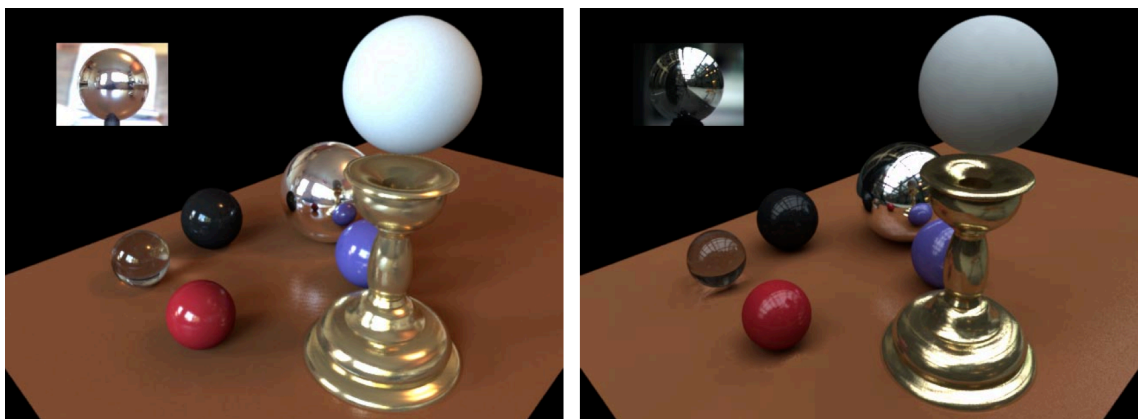
diseñados para capturar un rango de valores de brillo menor. Como resultado, las fuentes de luz por lo general se convierten en un punto de saturación del sensor de imagen, sin dejar registro de su verdadero color o intensidad. Esto no es un problema importante para las superficies de metal brillante, porque los reflejos brillantes tendrían el mayor valor de iluminación en las imágenes finales. Sin embargo, en el resto de superficies que forman la escena el efecto incorrecto de la captura de la imagen puede ser muy significativo.

Para solventar este problema en la toma de las imágenes digitales, Debevec y Malik [29] desarrollaron una técnica para capturar el rango dinámico de la luz en una escena, incluyendo las fuentes directas de luz. Las fotografías son tomadas en una serie de tomas con diferentes ajustes de exposición en la cámara, unas imágenes registran las iluminaciones de la escena, otras registran la iluminación directa de las fuentes de luz sin saturación. Posteriormente, se reúne esta serie limitada de imágenes de bajo rango dinámico en una sola imagen de alto rango dinámico (denominadas imágenes HDR o HDRIs) que representa la dinámica ampliada de iluminaciones para cada uno de los puntos de la escena. El uso de valores de coma flotante de 32 bits para los valores RGB de los píxeles de estas imágenes, hace que los rangos en las iluminaciones superen incluso el valor de un millón.



*Figura 19.* Ejemplo de las diferentes tomas necesarias para la generación del archivo HDRi incluyendo los valores RGB de varios puntos significativos.

En 1998 se presenta un nuevo procedimiento para iluminar los objetos sintéticos la iluminación basada en imágenes (IBL), que aborda las limitaciones restantes del mapeado ambiental [30]. El primer paso en IBL es colocar el mapa de la imagen en el interior de una superficie esférica que rodea la escena, en lugar de la asignación de la imagen directamente sobre la superficie del objeto. A continuación se utiliza un sistema de iluminación global (como el Path tracing descrito por Kajiya) para simular la iluminación incidente sobre la superficie del objeto. De esta manera, el algoritmo de iluminación global proyecta rayos sobre cada punto del objeto en la escena para determinar qué es lo que está iluminado. Algunos de los rayos tienen el camino libre entre el objeto y la superficie de iluminación basada en imágenes. En consecuencia, la iluminación de cada parte visible del entorno se puede tener en cuenta. Otros rayos son bloqueados por los objetos de la escena proyectando sombras. El algoritmo calcula la suma de toda la luz que llega directamente e indirectamente del entorno a cada punto de la superficie de los objetos obteniéndose así la iluminación sobre éstos. La elegancia de este enfoque reside en el hecho de que se reproducen todos los efectos de la realidad del entorno sobre el objeto iluminado, incluyendo las sombras propias, y se puede aplicar a cualquier material, desde el metal al plástico o al vidrio *Figura 20*.



*Figura 20.* Dos ejemplos de iluminación basada en imágenes IBL.

La primera vez que se mostró la iluminación con imágenes de alto rango dinámico fue en un corto de animación llamado “Rendering with Natural Light”, en SIGGRAPH 98 y mostraba una naturaleza muerta de esferas difusa, brillante y transparente en un pedestal, iluminado por una imagen HDRI del bosque de eucaliptos en la UC Berkeley.



*Figura 21.* Fotograma del video “Rendering with Natural Light”



## Imagen sintética basada en el Método Monte Carlo

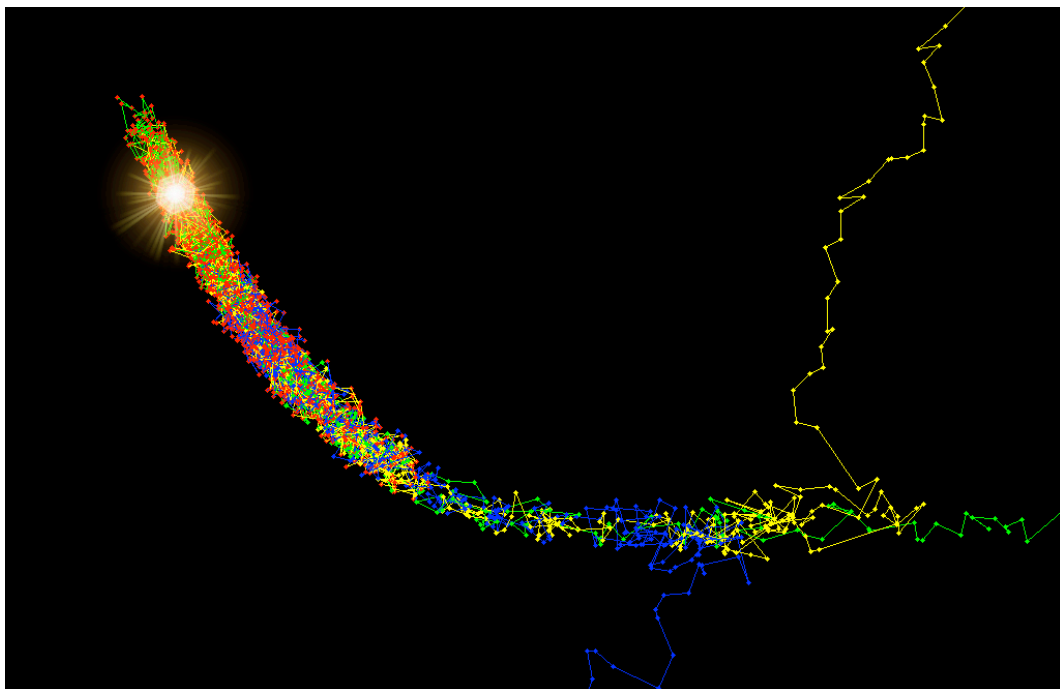
Los métodos de Monte Carlo son algoritmos que se utilizan extensamente para simular sistemas complejos mediante la resolución de ecuaciones por métodos de aproximaciones aleatorias. Se oponen por consiguiente a los métodos deterministas que darían, en teoría, soluciones exactas pero que no pueden utilizarse porque no pueden formularse con precisión o porque el tiempo de cálculo sería inabordable.

Aunque sus fundamentos están estrechamente ligados con el desarrollo de la teoría de probabilidad y, en particular, con los procesos estocásticos conocidos como cadenas de Markov (1856-1922, matemático ruso, que sentó las bases de la moderna teoría de probabilidades) y los trabajos del también matemático ruso Kolmogorov que en 1931 mostró la relación entre estos procesos y determinados tipos de ecuaciones diferenciales e integrales, los primeros en utilizar la técnica y el nombre fueron el grupo de científicos formado por Stanislaw Marcin Ulam y Nicholas Metrópolis [31].

La descripción que hace Stanislaw Ulam, a quien se atribuye la invención del método o cuando menos su bautismo, es quizás la mejor descripción que se puede usar, sin entrar en detalles técnicos. La idea surgió de los intentos de calcular las probabilidades de que un solitario con 52 cartas saliera bien. Después de dedicar mucho tiempo a varios intentos infructuosos, se planteó que un método más efectivo sería hacer el solitario 100 veces y contar el número de veces que se tenía éxito. La posibilidad de aplicar este razonamiento a simulaciones que ya comenzaban a beneficiarse de la velocidad de los nuevos ordenadores es lo que les dio la idea de aplicarlo a casos más importantes, lo que hicieron con considerable éxito a mediados de los años 40 del pasado siglo. El nombre viene, evidentemente, del casino existente en esta zona del principado de Mónaco y del juego de la ruleta.

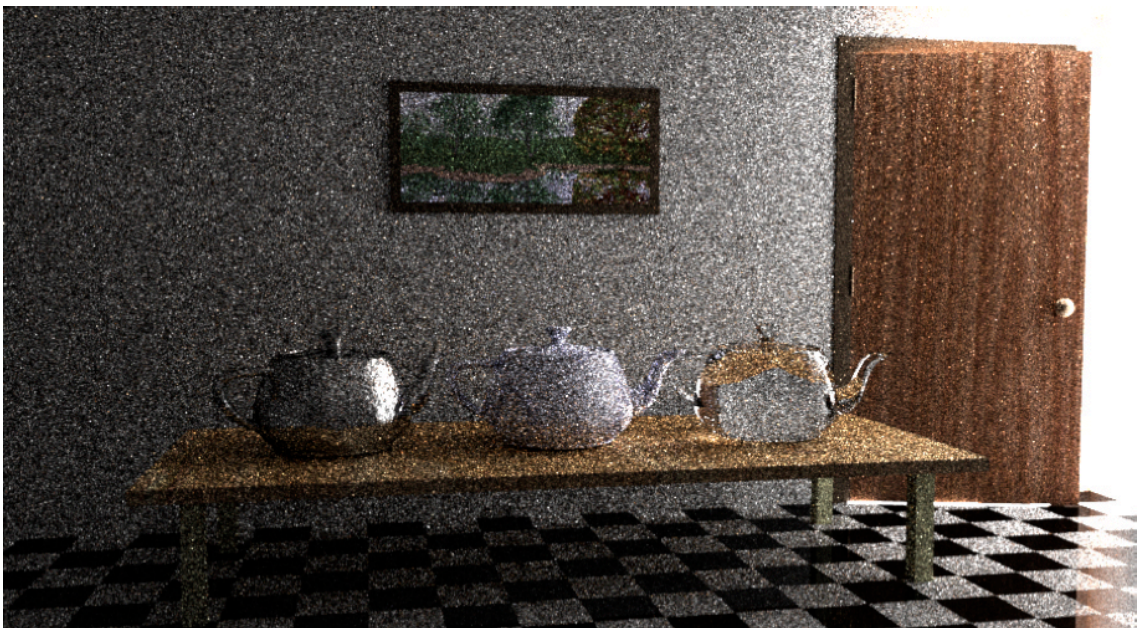
Naturalmente para que el método sea efectivo es necesario que el sistema pueda ser descrito mediante funciones de distribución probabilística, lo que no es una tarea trivial. A partir de una función de este tipo todo lo que hay que hacer es asignar variables aleatorias y poner en marcha la simulación (en algunos casos, millones de veces) y promediar el número de soluciones que apuntan en la dirección correcta. Hay variaciones importantes como el número y tipo de muestras utilizadas o el rango de variación admitido para las variables que se pueden encontrar, como parámetros específicos que afectan a la velocidad y a la precisión del cálculo.

El Metropolis light transport (MLT) de Eric Veach y Leonidas J. Guibas aparece en SIGGRAPH 1997 [32]. En este trabajo se describe una aplicación de una variante del método Monte Carlo llamado algoritmo de Metropolis-Hastings sobre la “rendering equation” de Kajiya para la generación de imágenes a partir de descripciones físicas detalladas de escenas en tres dimensiones.



*Figura 22.* Resultado de tres cadenas de Markov corriendo sobre la función 3D Rosenbrock mediante el uso del algoritmo Metropolis-Hastings. Puede observarse como convergen los resultados.

El Muestreo Metrópolis es un método “inteligente” de toma de muestras, que utiliza el algoritmo de Metropolis-Hastings para implementar Metrópolis Light Transport (MLT). La toma de muestras metrópolis trata de "buscar la luz". Esto hace que sea una buena opción en casi todas las situaciones. Para ello, hace pequeños cambios al azar de una muestra de referencia inicial y mira si la nueva muestra es más interesante que la anterior. Si no es así, la muestra se descarta y se toma una nueva. Si la nueva muestra tiene un brillo aceptable, metrópolis la adoptará como muestra de referencia. Posteriormente se explora la zona que la rodea mediante el uso de pequeñas mutaciones. Este proceso de alteración de una muestra es llamado Small mutation. Se puede dar el caso de que este proceso conduzca a error y se produzcan puntos anormalmente luminosos en la escena llamados luciérnagas. En los ejemplos siguientes se puede ver la ventaja en cuanto a rendimiento que se obtiene gracias al uso del MLT, ambas imágenes forman parte del documento presentado en Siggraph 97.



*Figura 23.* Bidirectional path tracing con 40 muestras por pixel.



*Figura 24.* Metropolis light transport con una media de 250 mutaciones por pixel, el mismo tiempo de computación que la imagen anterior.

En 2004 Matt Pharr y Greg Humphreys publican “Physically based rendering, from theory to implementation” [33], sentando las bases del PBRT, un trazador de rayos de uso académico en el que el objetivo principal es obtener imágenes basadas en la física real de la luz. Esta publicación es en sí misma una guía pedagógica para el desarrollo de herramientas de software, desde las matemáticas y los algoritmos que se esconden detrás de los cálculos, a la ingeniería de software necesaria para poder obtener resultados físicamente realistas.

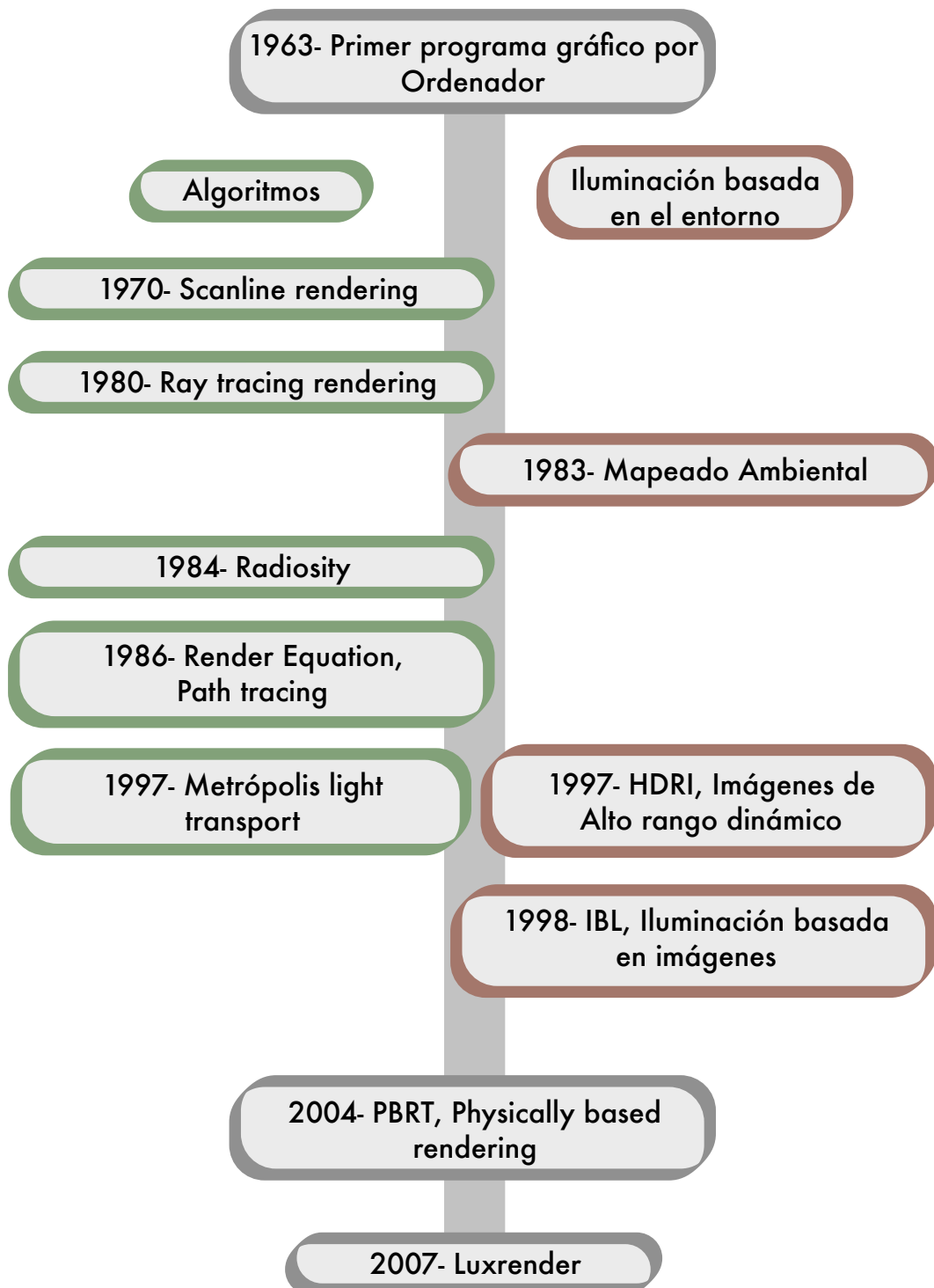
Se tratan métodos y técnicas que permiten reducir el tiempo y los recursos necesarios para la obtención de resultados óptimos, así como ejemplos reales de código de programación y los resultados obtenidos con ellos. Ofrece de esta manera un enfoque integral que raramente se encuentra en otras publicaciones. En 2010 aparece la segunda edición ampliada en la que se profundiza aún más en la implementación del Metrópolis Light Transport.

## Luxrender

En 2007, un pequeño grupo de programadores liderados por Terrence Vergauwen asumió el reto de modificar el trazador de rayos PBRT desarrollado por Pharr y Humphreys bajo los términos de la licencia de software libre GPL, creando Luxrender un motor de render basado en la física de la luz. A finales de 2007, la versión inicial de LuxRender fue liberada. Desde entonces, la velocidad de representación y el número de funciones disponibles ha estado creciendo constantemente gracias al trabajo desinteresado de decenas de programadores y miles de usuarios interesados en la obtención de imágenes físicamente correctas.

La unión entre Blender como herramienta de software 3D para la construcción de las escenas a simular y el uso del motor de render Luxrender para la obtención de resultados físicos, ha sido la base de software que se ha usado para el desarrollo de las simulaciones del presente trabajo. Ambas herramientas son de código libre y los avances obtenidos pueden ser fácilmente comprobados e incorporados a otras líneas de investigación sin los altos requerimientos económicos que implican otras soluciones comerciales. A su vez el estar bajo licencias libres permite que la divulgación de los resultados se vea únicamente influenciada por intereses puramente científicos y académicos.

## Esquema general de la imagen sintética



# Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es presentar un método rápido económico y seguro para encontrar la estructura tensada semitransparente óptima que se pueda colocar en la entrada de cada túnel con el mayor ahorro energético posible y sin comprometer la estabilidad mecánica de la misma.

Como consecuencia de este objetivo fundamental dada la alta complejidad de la modelización de las propiedades fotométricas del sol, las estructuras y los túneles, otro objetivo clave de este trabajo es presentar una manera eficaz para calibrar el software con los parámetros reales de los elementos a simular.

De los objetivos anteriores se desprenden otros cuyo cumplimiento garantizará el éxito de este trabajo:

- Ahorro energético.
- Ahorro en el número de luminarias y lámparas con la consiguiente reducción sobre el impacto ambiental (residuos industriales, emisiones de CO<sub>2</sub>, reciclaje ...).
- Ahorro en los materiales de construcción de las estructuras al reducir el número de pruebas y poder optimizar el diseño de las mismas.
- Proporcionar una metodología barata y rápida que permita al proyectista evaluar la conveniencia de instalar una estructura tensada en la entrada de un túnel y, en caso positivo, determinar la forma y material óptimos para la misma.



# Resultados

## Virtualización

### Virtualización del modelo a escala

Tomando como base los planos de despiece de la maqueta que se ha construido en el laboratorio, hemos creado un modelo virtual, que si bien no posee todos los elementos del modelo real, tiene todos aquellos que son necesarios para poder obtener simulaciones lumínicas.

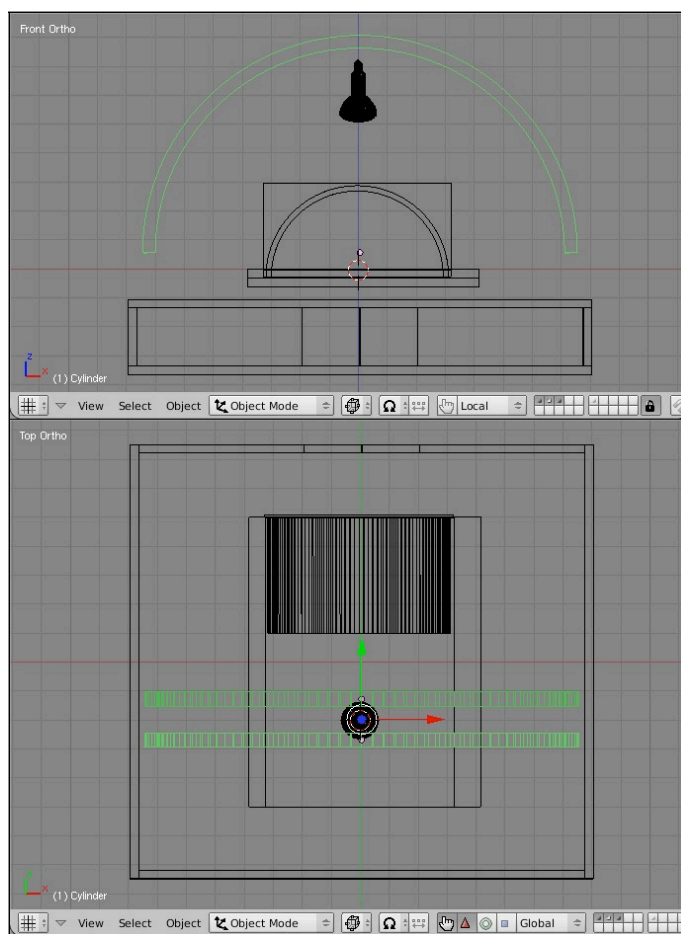
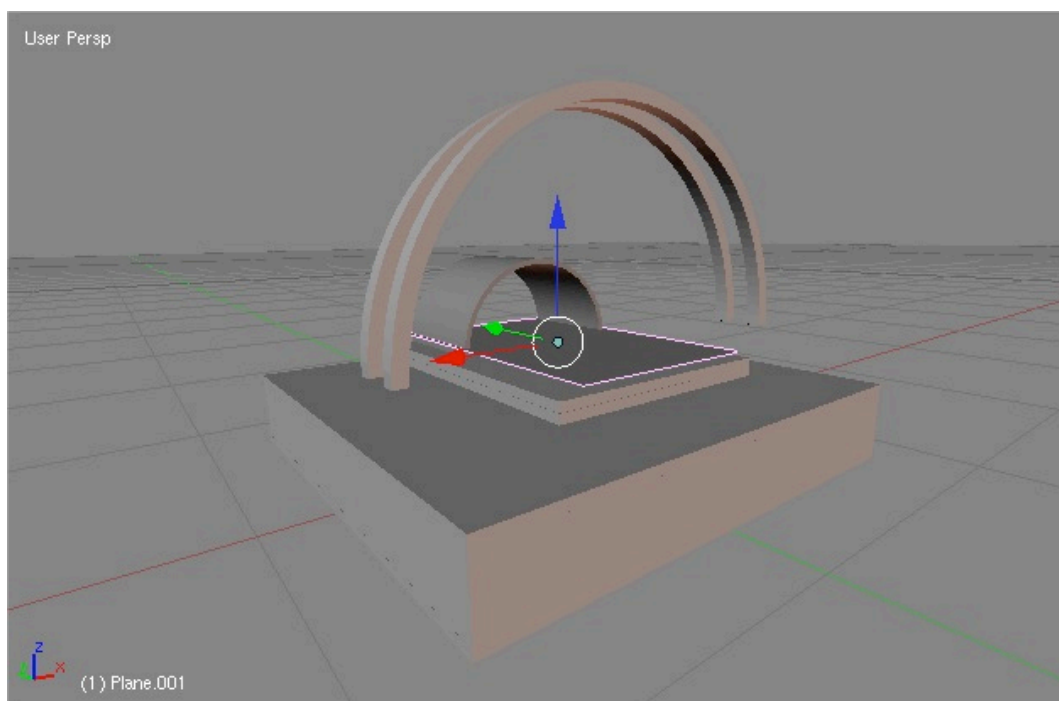


Figura 25. Vistas ortogonales.

Los arcos que desarrollan la eclíptica, sólo tienen importancia a nivel de visualización y como referencia para los ángulos.

Se ha creado un elemento adicional, un plano translucido que hace las veces de zona de rodadura de la vía. Este elemento bidimensional, nos mostrará la iluminación que le llega desde el foco por transparencia. Este sistema es similar al usado en las pantallas de enfoque de las cámaras fotográficas, que gracias a una determinada y conocida opacidad nos permiten observar la imagen. Como consecuencia podemos colocar cualquier objeto intermedio entre la fuente de luz y la calzada, y podemos obtener el resultado lumínico sobre la calzada una vez atravesados los obstáculos. Este plano es el que se encuentra seleccionado en la *Figura 26*.

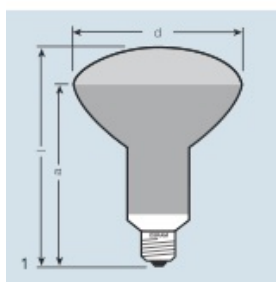


*Figura 26.* Plano de trabajo.

### **Virtualización del Foco Vitalux**

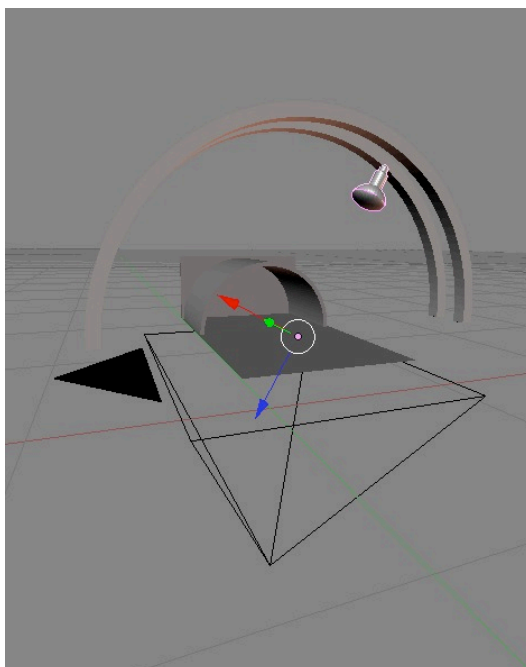
Partiendo de los datos del fabricante, generamos una reproducción del foco vitalux que se está usando en la maqueta, *Figura 27*. Esta nos permite

aproximarnos al modelo real, pero posee las mismas limitaciones que éste. La zona iluminada sólo cubre, de forma homogénea, una superficie de 50 cm de diámetro, lo que implica tener que variar la posición del foco para realizar las diferentes mediciones.



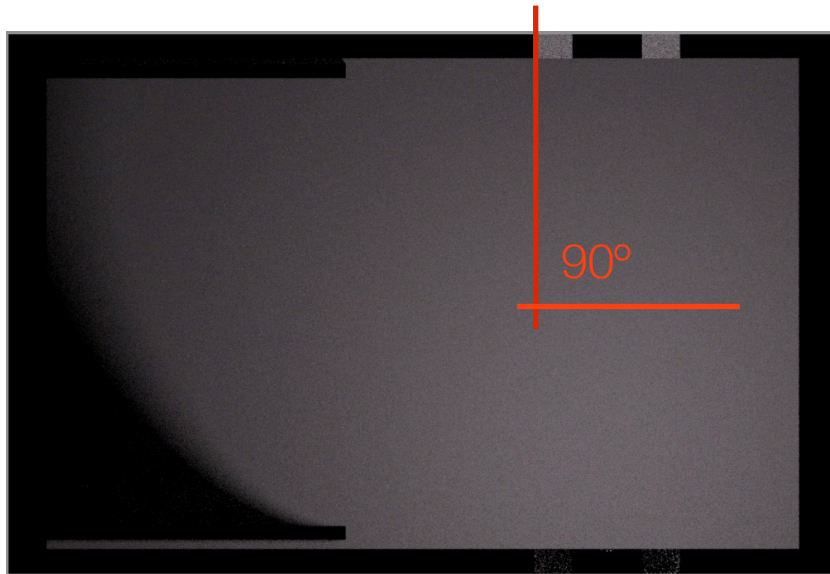
*Figura 27.* Dimensiones del Foco Vitalux.

A continuación, se muestra el modelo virtual simplificado usado en las simulaciones. La pirámide invertida que aparece en la *Figura 28* es el objeto cámara que nos mostrará los resultados en una imagen.

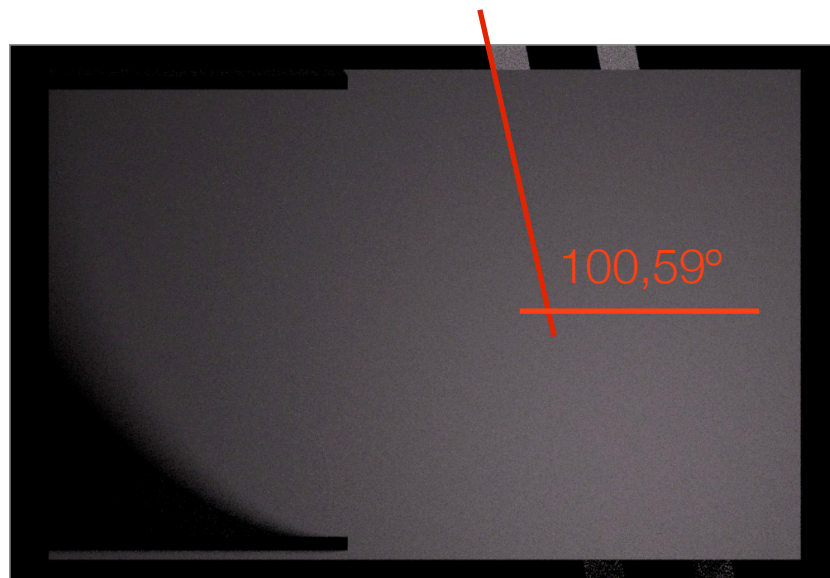


*Figura 28.* Modelo simplificado.

Usando este sistema de iluminación y sin incluir todavía ninguna estructura tensada, se obtienen sobre el plano translúcido imágenes como la que se muestra en la *Figura 29* para un túnel con orientación Norte. Y en la *Figura 30* para el túnel de Pegalajar con orientación N 349.41°, que es el que se utilizará para esta simulación por su orientación Norte Sur casi perfecta.



*Figura 29.* Iluminación del Foco sobre la calzada. Con los arcos de la eclíptica a  $90^\circ$  con respecto al eje de la calzada.



*Figura 30.* Iluminación del Foco con la orientación del Túnel de Pegalajar. Con los arcos de la eclíptica a  $100,59^\circ$  con respecto al eje de la calzada.

## Ajustes del programa

Tras un examen detallado del foco, hemos llegado a la conclusión de que es necesario rehacer el modelo virtual para aproximarlos aún más al modelo real del laboratorio. Para esto tomamos una imagen de referencia del natural, ya que los datos aportados por el fabricante difieren sensiblemente del objeto real, como puede apreciarse en la Figuras 31 y 32.

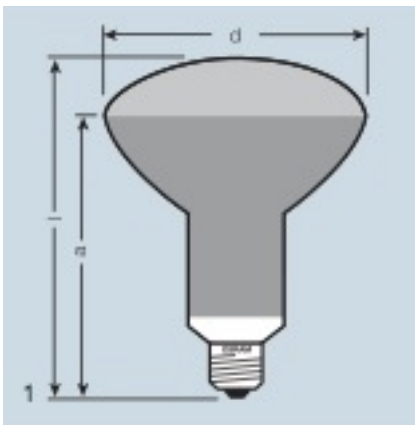


Figura 31. Foco teórico.



Figura 32. Foco real.

Para el plano de medición se ha usado un material translúcido que posee un coeficiente de transmisión de la luz de  $1/2$  por lo que los valores obtenidos se tendrán que multiplicar por 2 para ser restituida la pérdida en el material.

Se ha realizado un primer pase obteniendo imágenes de 16 bits por canal. Una vez analizadas nos arrojan un rango de medición de 32767 valores posibles de intensidad luminosa que se muestran insuficientes para nuestro propósito.

Por ello, para la generación de los resultados se van a usar archivos de alto rango dinámico, más concretamente en el formato OpenEXR que han mostrado su capacidad para superar los 1000 000 000 de valores de intensidad medibles, con lo que el rango es más que suficiente para nuestro análisis. Este tipo de archivo tiene por contra el inconveniente de no ser visualizable en su totalidad y requerir una aproximación a 8 bits si se desea tener una idea de la distribución de la luminosidad como se verá en un ejemplo posterior.

El siguiente paso va a consistir en comprobar la linealidad del sistema, para lo que se han realizado varias simulaciones modificando el valor de eficacia del foco. Se han usado los siguientes valores 1, 10, 50 y 100, siendo el primero y el último los valores límite que permite el software empleado. A su vez se han aplicado valores de ajuste de la exposición de -10, 1 y +10 sobre la imagen de alto rango dinámico. En la *Tabla 2* se muestran los valores obtenidos.

	60	A	45	B	30	C	15
<b>valor exposición +10 32bit</b>							
<b>maqueta_ajuste_lámpara_100.exr</b>	764270	1,44	1101689	1,14	1254701	1,1	1101951
<b>maqueta_ajuste_lámpara_50.exr</b>	381523	1,44	550115	1,14	627163	1,1	550839
<b>maqueta_ajuste_lámpara_10.exr</b>	76414	1,44	109684	1,15	125589	1,1	110144
<b>maqueta_ajuste_lámpara_1.exr</b>	7653	1,43	10959	1,15	12554	1,1	11002
<b>valor exposición 1 32bit</b>							
<b>maqueta_ajuste_lámpara_100.exr</b>	746,4	1,44	1076	1,14	1225	1,1	1076
<b>maqueta_ajuste_lámpara_50.exr</b>	372,6	1,44	537,2	1,14	612,5	1,1	537,9
<b>maqueta_ajuste_lámpara_10.exr</b>	74,62	1,44	107,1	1,14	122,6	1,1	107,6
<b>maqueta_ajuste_lámpara_1.exr</b>	7,473	1,43	10,70	1,15	12,26	1,1	10,74
<b>valor exposición -10 32bit</b>							
<b>maqueta_ajuste_lámpara_100.exr</b>	0,729	1,44	1,051	1,14	1,197	1,1	1,051
<b>maqueta_ajuste_lámpara_50.exr</b>	0,364	1,44	0,525	1,14	0,598	1,1	0,525
<b>maqueta_ajuste_lámpara_10.exr</b>	0,073	1,44	0,105	1,14	0,120	1,1	0,105
<b>maqueta_ajuste_lámpara_1.exr</b>	0,007	1,43	0,010	1,2	0,012	1,2	0,010

*Tabla 2.* Mediciones con diferentes valores de eficacia del foco.

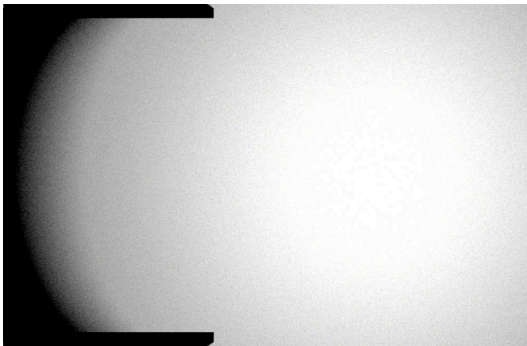
Los valores A corresponden al cociente entre el valor a 45 cm y el obtenido a 60 cm. Los valores B al obtenido entre el valor a 30 cm y el de 45 cm y por último los valores C a el valor a 30 entre el valor a 15. Como puede apreciarse los cocientes permanecen estables para el ajuste de la lámpara (eficacia del foco) de 100 y de 50, mientras que para 10 y 1 la consistencia se reduce. Por esta razón, vamos a usar siempre valores entre 50 y 100 que son los que aportan la necesaria estabilidad en las mediciones.

Puede observarse igualmente que modificando el valor de exposición de la imagen, lo que se obtiene son múltiplos o divisores de la imagen matriz con valor 1, por lo que no se añade ningún beneficio con el uso de este modificador. La *Tabla 3* queda de esta manera reducida a la *Tabla 4* en la que podemos observar que aún tratándose de dos imágenes diferentes, los valores que se obtienen con una eficacia del foco de 100 son iguales que los obtenidos para un valor de eficacia de 50, si estos últimos se multiplican por 2, lo que deja constancia de la linealidad del sistema de generación de imágenes.

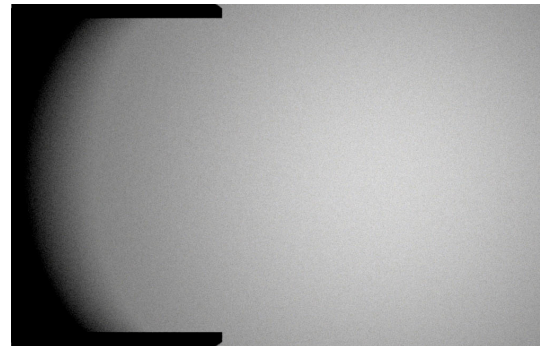
	60	A	45	B	30	C	15
<b>valor exposición 1 32bit</b>							
<b>maqueta_ajuste_lámpara_100.exr</b>	746,4	1,44	1076	1,14	1225	1,14	1076
<b>maqueta_ajuste_lámpara_50.exr</b>	372,6	1,44	537,2	1,14	612,5	1,14	537,9
	2,00		2,00		2,00		2,00

*Tabla 3.* Medias entre los valores a distintas distancias.

A continuación se muestran ambas imágenes modificadas a 8 bits para que se pueda observar una referencia de la iluminación que aporta el foco.



*Figura 33.* maqueta\_ajuste\_lámpara\_100.exr



*Figura 34.* maqueta\_ajuste\_lámpara\_50.exr



Para nuestro caso, al usar un elemento translúcido con una reducción en la luminosidad de 1/2 y habiendo fijado el valor de eficacia en 50, se obtienen los siguientes valores una vez aplicado el multiplicador que corrige la deformación sufrida en el plano.

valor exposición 1 32bit	60	45	30	15
maqueta_ajuste_lámpara_50 corregida	746,4	1076	1225	1076

*Tabla 4.* Valores resultado de las mediciones sobre el modelo simulado.

## Calibración del modelo digital

Para la calibración del modelo digital se han tomado como base los siguientes datos obtenidos de la maqueta:

- Distancia de la eclíptica al borde de las calzadas 30 cm.
- Iluminación cenital perpendicular al plano de medición.
- Distancia desde el frontal del foco hasta el plano de medición de 51 cm.
- Toma de valores sobre dos ejes perpendiculares a intervalos 0 cm, 15 cm y 30 cm.
- Toma del valor de luz de fondo para descontar del total.

Se fijan los arcos que sustentan el foco a 30 cm del borde exterior de las calzadas.

Se fija el foco en la eclíptica en su punto superior, quedando este perpendicular al plano de medición (calzadas).

Se mide la distancia entre el punto más bajo del foco y la superficie del plano de medición que se encuentra en la vertical de este, obteniéndose un valor de 51 cm.

Se pone en funcionamiento el foco y se espera el tiempo necesario para que la iluminación se estabilice, para ello se realizan mediciones de comprobación con el luxómetro hasta que el valor obtenido es estable.

Tomando dos alineaciones perpendiculares una en el eje de la vía y la otra perpendicular a esta, se marcan puntos a 15 cm en ambas direcciones para cada uno de los ejes, mas otros dos a 30 cm en ambas direcciones a lo largo del eje de la vía.

Para estos puntos de medición se han obtenido los siguientes valores en lux.

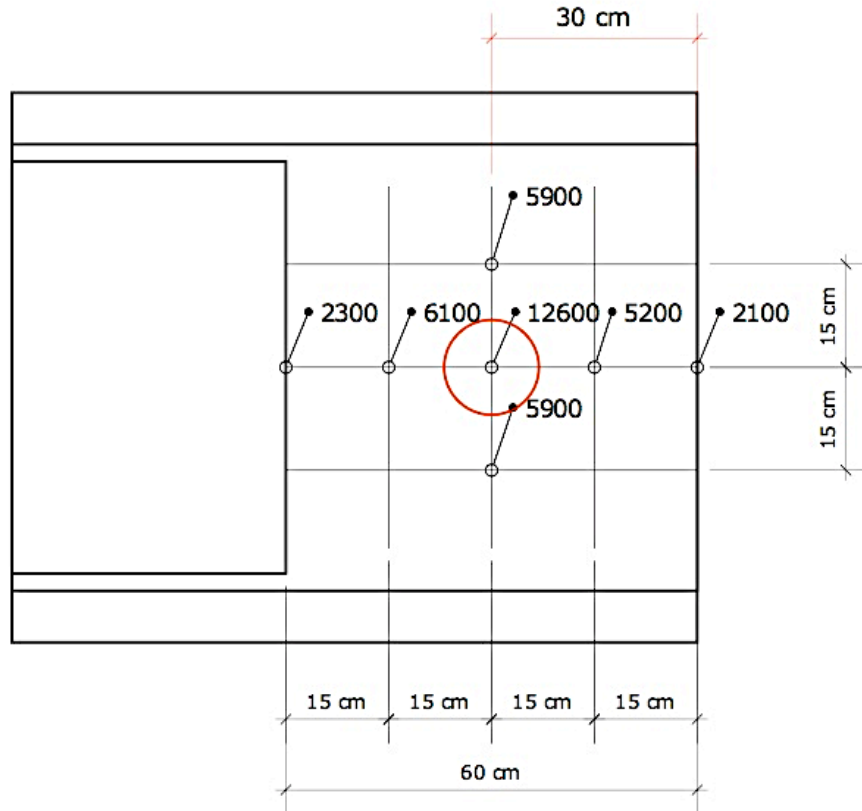


Figura 35. Foco Cenital.

A estos valores se les deben restar 300 lux debidos a la iluminación de fondo que se ha medido apagando el foco y midiendo nuevamente en los puntos anteriores.

Si observamos los datos obtenidos podemos comprobar que los valores que se obtienen a la misma distancia del centro sobre los distintos ejes no son uniformes, apreciándose una diferencia de 900 lux entre el valor que corresponde a 15 cm a la derecha del central con respecto al valor a 15 cm a la izquierda (medidos sobre el eje de la vía) si bien entre los valores superior e inferior dicha diferencia no existe. En un primer momento podemos suponer que dicha diferencia es debida a la reflexión del interior del túnel, pero tras una nueva medición a 20 cm del foco en las cuatro direcciones detectamos, que lo que ocurre es que la iluminación que

genera no es uniforme y esto es debido a la estructura interna del foco. Para solventarlo va a ser necesario un ensayo más completo con el fin de generar un archivo de iluminación que nos permita reproducir el foco de manera virtual, ya que su comportamiento no es homogéneo.

### **Generación del modelo de iluminación**

Debido a la falta de homogeneidad de la lámpara, se ha tomado la decisión de generar un archivo de iluminación para poder reproducirla de manera virtual. Para este fin, se va a utilizar el estándar “ies” de la illuminating engineering society por ser este el más extendido a nivel mundial, y por ser el usado en el software que vamos a emplear en la simulación.

En la generación de este archivo se han tomado mediciones en lux para los ángulos  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$  en el plano vertical, siendo el primer ángulo ( $0^\circ$ ) el correspondiente a una iluminación cenital. Estas mediciones se van a tomar en el plano horizontal para los ángulos  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$  y  $360^\circ$  siendo este último una repetición del tomado para ángulo  $0^\circ$  que sirve de comprobación. A su vez y debido a la iluminación de fondo que tenemos en el laboratorio, se han tomado mediciones de ésta para cada uno de los ángulos verticales, con el fin de poder corregir el exceso que se provocan debido a las lámparas de la sala.

Para normalizar la medición se ha preparado un elemento guía con forma de arco de 1 metro de radio. Este elemento está formado por una poligonal de 5 lados, en la que cada uno de ellos forma un ángulo de  $15^\circ$  con el anterior, *Figura 36*. De esta manera, una vez situado el primer tramo paralelo al suelo, el resto de los tramos nos permiten hacer mediciones de 15 en  $15^\circ$ , *Figura 37*.



*Figura 36.* Arco poligonal de 1m de radio, con tramos cada 15°.



*Figura 37.* Proceso de toma de medidas en el laboratorio.

La toma de los valores se ha realizado girando el foco para mantener en todo momento la homogeneidad de los datos de la luz de fondo.

Con los datos así obtenidos se ha generado el archivo de iluminación Vitalux300.ies que se muestra en la *Figura 38*.

```

IESNA91
[TEST] Vitalux 300
[MANUFAC] OSRAM
TILT=NONE
1
-1
1
7
9
1
2
0.0 0.0 0.0
1.0 1.0 0.0
0.0 5.0 15.0 30.0 45.0 60.0 90.0
0.0 45.0 90.0 135.0 180.0 225.0 270.0 315.0 360.0
3258.0 3174.0 2817.0 1365.0 795.0 561.0 0.0
3258.0 3084.0 2397.0 1140.0 772.0 546.0 0.0
3258.0 3024.0 2102.0 1065.0 739.0 534.0 0.0
3258.0 3234.0 1977.0 1000.0 700.0 511.0 0.0
3258.0 3369.0 1802.0 921.0 682.0 500.0 0.0
3258.0 3464.0 1887.0 980.0 725.0 534.0 0.0
3258.0 3449.0 2237.0 1082.0 747.0 558.0 0.0
3258.0 3264.0 2992.0 1388.0 809.0 591.0 0.0
3258.0 3174.0 2817.0 1365.0 795.0 561.0 0.0

```

*Figura 38.* Archivo Vitalux300.ies.

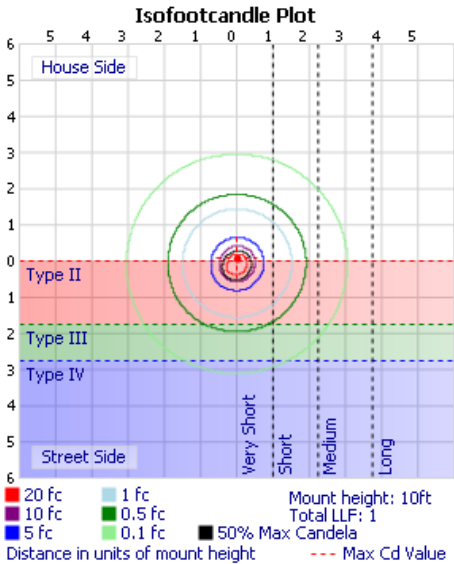
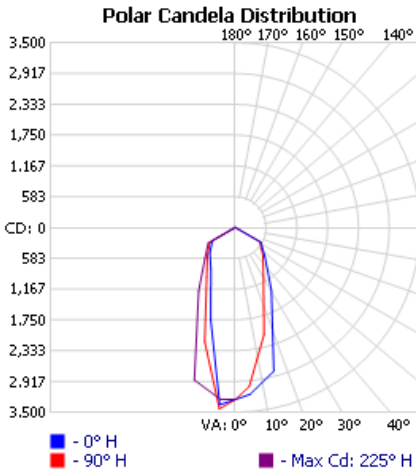
Estos datos de iluminación nos permiten obtener el siguiente informe fotométrico.



**VITALUX 300 - OUTDOOR PHOTOMETRIC REPORT**

MANUFACTURER: OSRAM  
 TEST #: VITALUX 300  
 LUMINAIRE:  
 LAMP OUTPUT: 1 LAMP(S), RATED LUMENS/LAMP: 4155.835  
 TEST BASED ON ABSOLUTE PHOTOMETRY.  
 LUMENS TOTAL = LAMP LUMENS.  
 INPUT WATTAGE: 0  
 LUMINOUS OPENING: POINT  
 MAX CD: 3,464.0 AT HORIZONTAL: 225°, VERTICAL: 5°  
 CUTOFF CLASS: N/A  
 ROADWAY CLASS: VERY SHORT, TYPE I  
 EFFICIENCY: 100%

No  
 Photo  
 Available

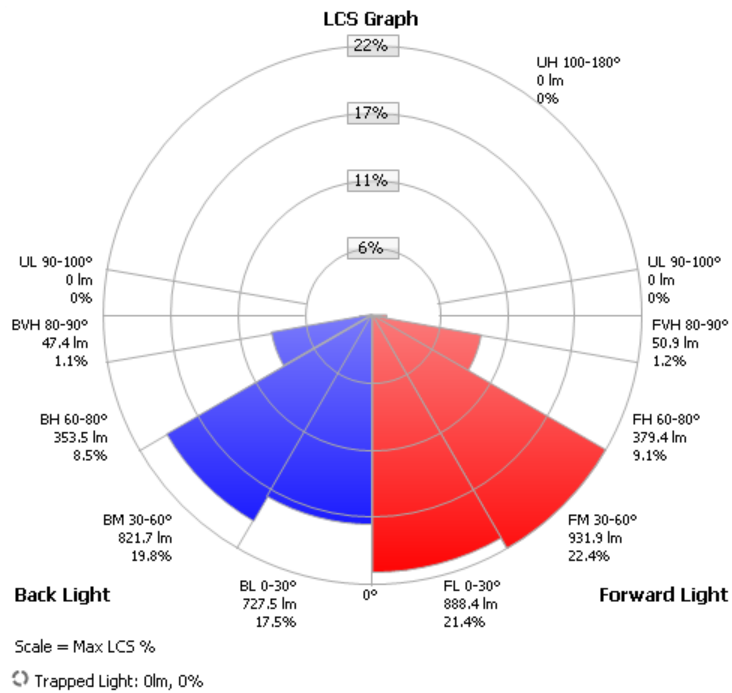


LUMENS PER ZONE					
ZONE	LUMENS	% TOTAL	ZONE	LUMENS	% TOTAL
0-10	311.0	7.5%	90-100	0	0%
10-20	645.3	15.5%	100-110	0	0%
20-30	632.4	15.2%	110-120	0	0%
30-40	641.0	15.4%	120-130	0	0%
40-50	572.1	13.8%	130-140	0	0%
50-60	529.1	12.7%	140-150	0	0%
60-70	544.5	13.1%	150-160	0	0%
70-80	280.5	6.7%	160-170	0	0%
80-90	0	0.0%	170-180	0	0%

ZONAL LUMEN SUMMARY			
ZONE	LUMENS	% LAMP	% LUMINAIRE
0-30	1,588.7	38.2%	38.2%
0-40	2,229.7	53.7%	53.7%
0-60	3,330.8	80.1%	80.1%
60-90	825.0	19.9%	19.9%
0-90	4,155.8	100%	100%
90-180	0	0%	0%
0-180	4,155.8	100%	100%

LCS Table		
BUG Rating	B2 - U1 - G1	
<b>Forward Light</b>	Lumens	Lumens %
Low(0-30):	888.4	21.4%
Medium(30-60):	931.9	22.4%
High(60-80):	379.4	9.1%
Very High(80-90):	50.9	1.2%
<b>Back Light</b>		
Low(0-30):	727.5	17.5%
Medium(30-60):	821.7	19.8%
High(60-80):	353.5	8.5%
Very High(80-90):	47.4	1.1%
<b>Uplight</b>		
Low(90-100):	0	0%
High(100-180):	0	0%
<b>Trapped Light:</b>	0	0%

Roadway Summary		
Cutoff Classification:	N/A	
Distribution:	TYPE I, VERY SHORT	
Max Cd, 90 Deg Vert:	0	
Max Cd, 80 to <90 Deg:	0	
	Lumens	% Lamp
Downward Street Side:	2,250.5	54.2%
Downward House Side:	1,950.2	46.9%
Downward Total:	4,200.7	101.1%
Upward Street Side:	0	0%
Upward House Side:	0	0%
Upward Total:	0	0%
<b>Total Lumens:</b>	<b>4,200.7</b>	<b>101.1%</b>



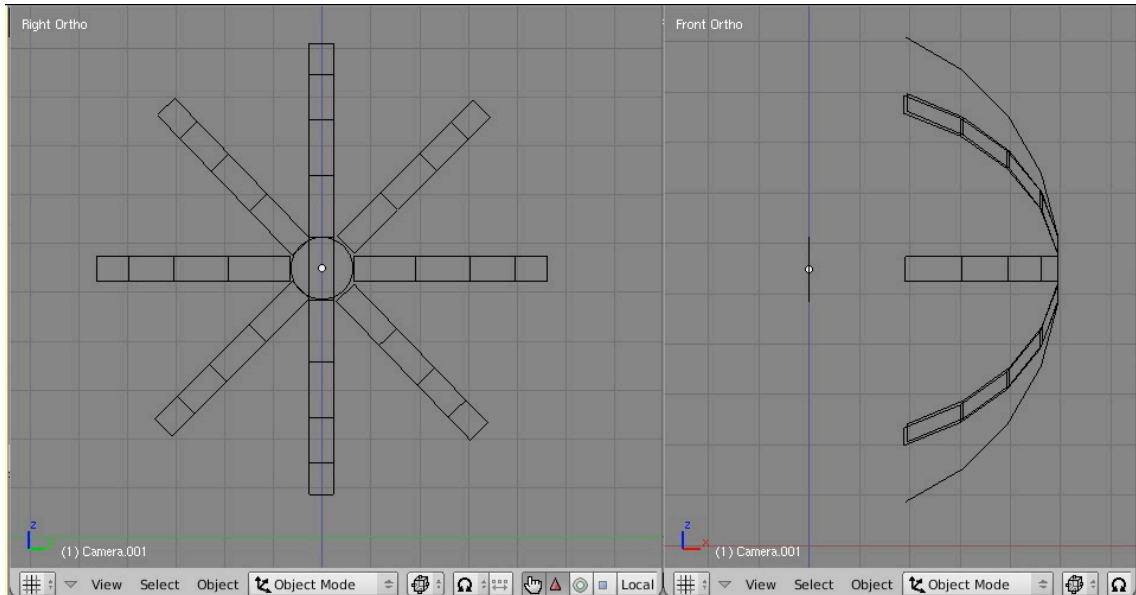
Candela Table - Type C									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
0	3258	3258	3258	3258	3258	3258	3258	3258	3258
5	3174	3084	3024	3234	3369	3464	3449	3264	3174
15	2817	2397	2102	1977	1802	1887	2237	2992	2817
30	1365	1140	1065	1000	921	980	1082	1388	1365
45	795	772	739	700	682	725	747	809	795
60	561	546	534	511	500	534	558	591	561
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Visual Photometric Tool 1.2.26 copyright 2010, Acuity Brands Lighting  
 Reported data calculated from manufacturer's data file, based on IESNA recommended methods.





Para la simulación hemos creado el siguiente modelo digital simplificado, en el que sólo existen los objetos imprescindibles para generar la calibración.



*Figura 39.* Modelo digital para calibrar el sistema.

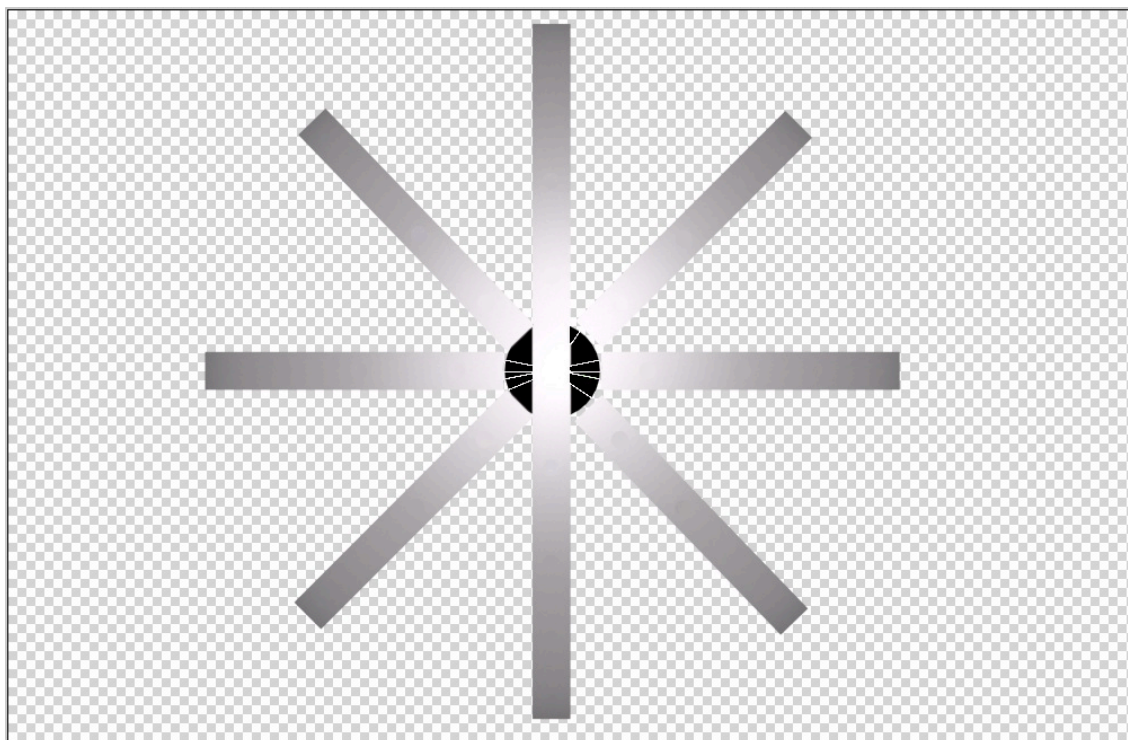
El disco central es el elemento que ilumina la escena. Sus dimensiones han de ser las mismas que las del foco real. A su vez, este objeto tiene aplicado un material luz que cumple con los datos del archivo Vitalux300.ies, como puede apreciarse en los datos fotométricos del material de la *Figura 40*. El resto de valores ( $W$  y eficacia) no son relevantes al trabajar con archivos de 32 bits como ya comprobamos en pasos anteriores.



Figura 40. Datos fotométricos del foco virtual.

Los elementos poligonales reproducen cada una de las distintas posiciones en las que se han tomado valores en el modelo real. En este caso se han generado 8 arcos, uno por cada uno de los ángulos en el plano horizontal, ya que el trabajo digital nos permite obtener una sola imagen del conjunto y posteriormente medir sobre ella todos los valores.

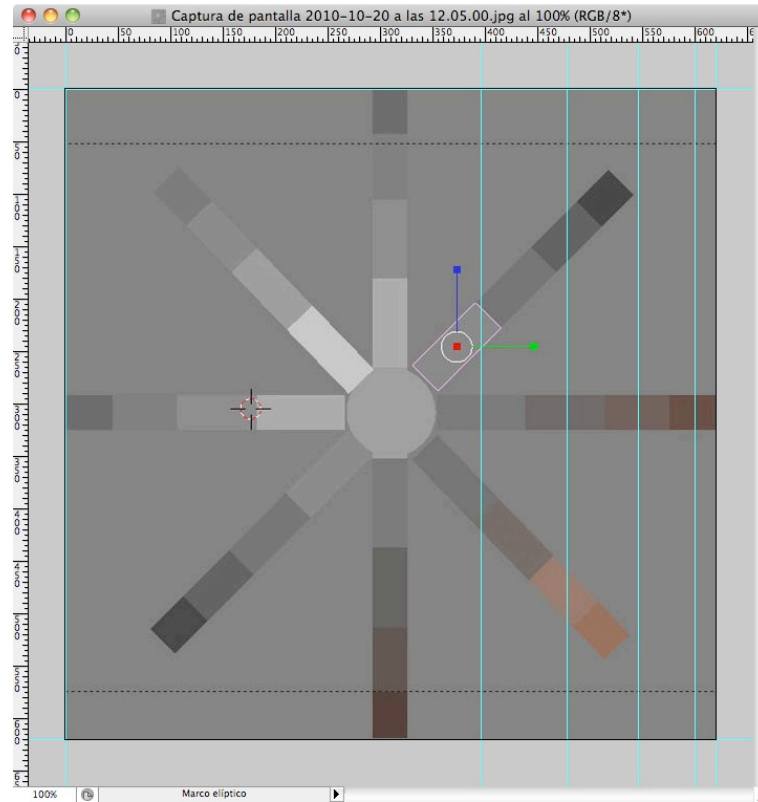
Para el render se usa una vista ortográfica, en la que se evitan las deformaciones debidas a la distancia que se obtendrían con una cámara fotográfica real. De esta manera se ha generado la imagen que se muestra en la *Figura 41*.



*Figura 41.* Imagen de 8 bits procedente del resultado de alto rango dinámico.

El disco central que aparece de color negro es en realidad, el disco que ilumina la escena según los datos del archivo Vitalux300.ies, las diferentes barras corresponden a los distintos arcos poligonales que hemos usado y sobre los que mediremos los datos digitales.

Para localizar los puntos virtuales que corresponden a los medidos en el modelo real, tomamos una imagen de referencia del modelo poligonal, en la que es posible distinguir los cambios de plano sobre el que se ha de medir, *Figura 42*.



*Figura 42.* Ejes de referencia para las mediciones en la simulación.

Para las medidas correspondientes a cada uno de los ángulos se ha tomado el valor promedio de una superficie de 15 mm de diámetro, esta superficie es igual a la de la sonda del luxómetro del laboratorio *Figura 43*.



*Figura 43.* Luxómetro con sonda externa.

En la *Tabla 5* pueden verse los datos medidos en el laboratorio. La última fila corresponde a la luz de fondo, que una vez descontado este valor ángulo a ángulo da como resultado la *Tabla 6*.

	0°	15°	30°	45°	60°
<b>MEDICIONES</b>					
0°	3510	3145	1630	1053	790
45°	3420	2725	1405	1030	775
90°	3360	2430	1330	997	763
135°	3570	2305	1265	958	740
180°	3705	2130	1186	940	729
225°	3800	2215	1245	983	763
270°	3785	2565	1347	1005	787
315°	3600	3320	1653	1067	820
fondo	336	328	265	258	229

*Tabla 5.* Mediciones del laboratorio.

	0°	15°	30°	45°	60°
<b>MEDICIONES-FONDO</b>					
0°	3174	2817	1365	795	561
45°	3084	2397	1140	772	546
90°	3024	2102	1065	739	534
135°	3234	1977	1000	700	511
180°	3369	1802	921	682	500
225°	3464	1887	980	725	534
270°	3449	2237	1082	747	558
315°	3264	2992	1388	809	591
	3258				

*Tabla 6.* Mediciones descontando el valor de luz de fondo.

En las medidas sobre el modelo simulado *Tabla 7*, sólo existe un valor para el ángulo vertical 0° (cenital), este valor es el que vamos a usar para la corrección y calibración con el modelo real.

	0°	15°	30°	45°	60°
<b>SIMULACIÓN</b>					
0°		3075	1621	950,5	658,4
45°		2744	1434	909,8	638,9
90°		2436	1248	861	602
135°	3765	2323	1148	806,6	584,2
180°		2167	1081	785,6	547,8
225°		2099	1104	835,8	588,7
270°		2606	1291	873,6	621,5
315°		3150	1674	969,2	663,4

*Tabla 7.* Mediciones en la simulación computacional.

Con el valor medio real, para el ángulo 0°, obtenido de las mediciones del laboratorio y el valor para dicho ángulo obtenido en el modelo virtual, se ha calculado el factor de corrección que afectará a las mediciones simuladas. Este valor es de  $\approx 1,15$ .

	0°	15°	30°	45°	60°
<b>SIMU. CORREGIDA</b>					
0°		2673,9	1409,6	826,5	572,5
45°		2386,1	1247,0	791,1	555,6
90°		2118,3	1085,2	748,7	523,5
135°	3258	2020,0	998,3	701,4	508,0
180°		1884,3	940,0	683,1	476,3
225°		1825,2	960,0	726,8	511,9
270°		2266,1	1122,6	759,7	540,4
315°		2739,1	1455,7	842,8	576,9

*Tabla 8.* Mediciones computacionales aplicado el valor de corrección.

Una vez aplicado el valor de corrección a los datos virtuales *Tabla 8*, se han calculado los cocientes ángulo a ángulo, entre estos y los del modelo real, dando como resultado la *Tabla 9* de desviación. Esta tabla ha sido convertida a porcentajes para que sea más fácil su comprensión. Podemos observar que la desviación se mantiene en todos los casos excepto en los seleccionados, por debajo del  $\pm 5\%$ , pudiendo de esta manera afirmar que el modelo computacional nos permite una muy buena aproximación al modelo real.

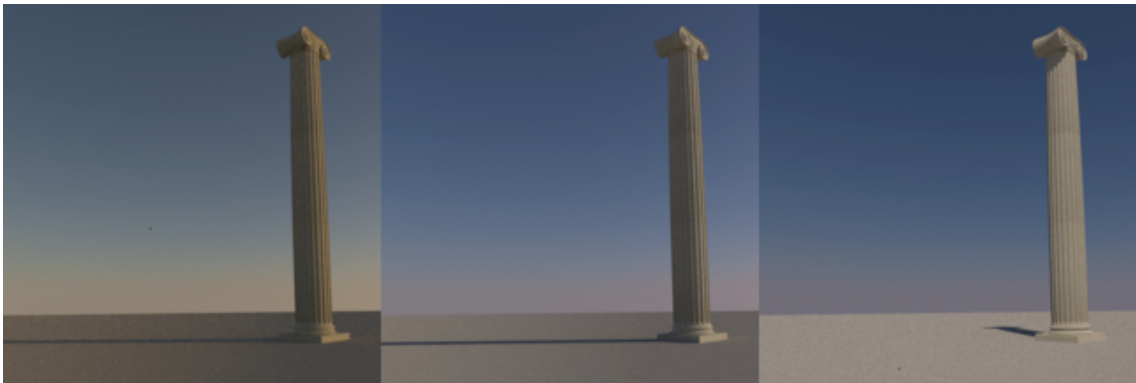
	0°	15°	30°	45°	60°
<b>DESVIACIÓN %</b>					
0°		-5,08	3,26	3,96	2,05
45°		-0,46	9,38	2,48	1,75
90°		0,77	1,90	1,31	-1,97
135°		2,18	-0,17	0,20	-0,59
180°		4,57	2,06	0,17	-4,73
225°		-3,27	-2,04	0,25	-4,14
270°		1,30	3,75	1,69	-3,15
315°		-8,45	4,87	4,18	-2,39

*Tabla 9.* Desviación entre valores de laboratorio y computacionales en tantos por ciento.

## Simulación

### Iluminación

Para poder producir una simulación realista basada en la luz solar es necesario introducir una serie de parámetros. El sistema de iluminación solar (sunsky) de Blender se basa en la creación de un objeto "sol", que combina una luz directa y una luz ambiental. El color de la luz depende del ángulo de ésta dentro de la eclíptica ver *Figura 44*.



*Figura 44.* Posición solar para la simulación.

Este ángulo viene definido por varios valores:

- Los valores geográficos de localización (latitud y longitud).
- La hora y la zona horaria, que nos indica la diferencia que nuestros relojes marcan con respecto al horario solar.
- La fecha en la que deseamos se realice la simulación.

Con la unión de todos estos datos, el programa calcula los ángulos (horizontal y vertical) que nuestro objeto sol tiene con respecto al plano de trabajo como puede observarse en la *Figura 45*.



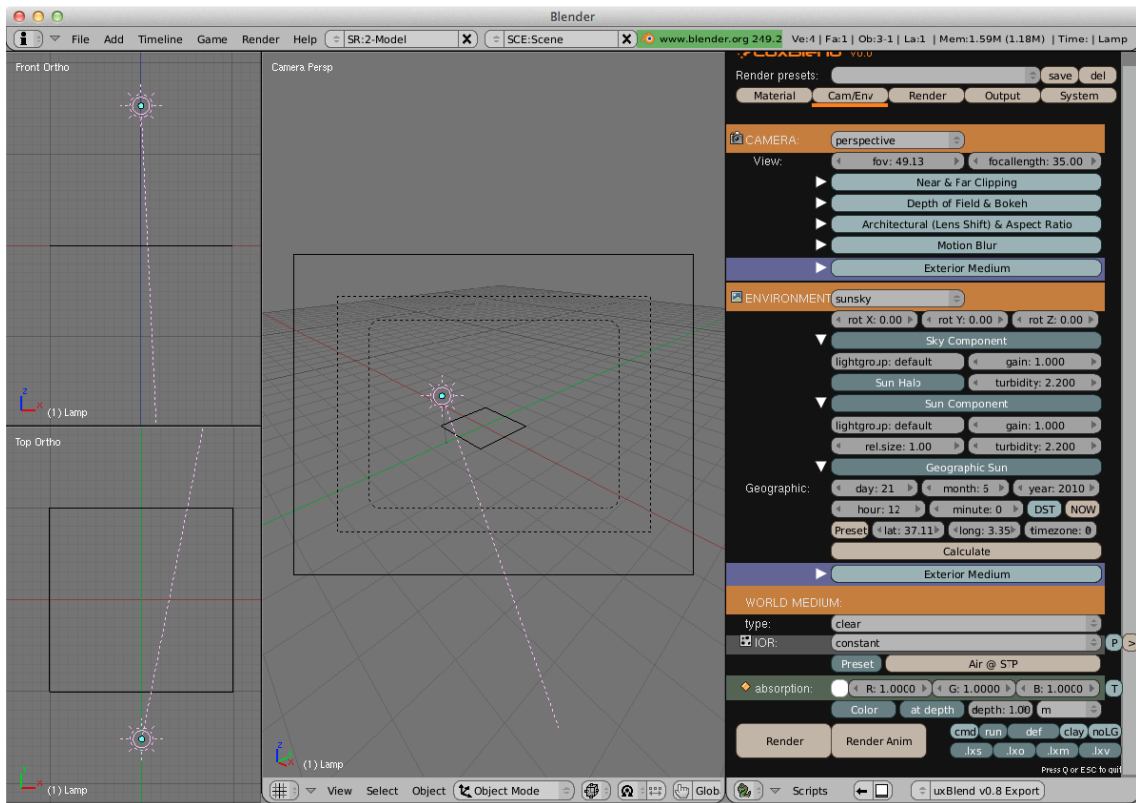


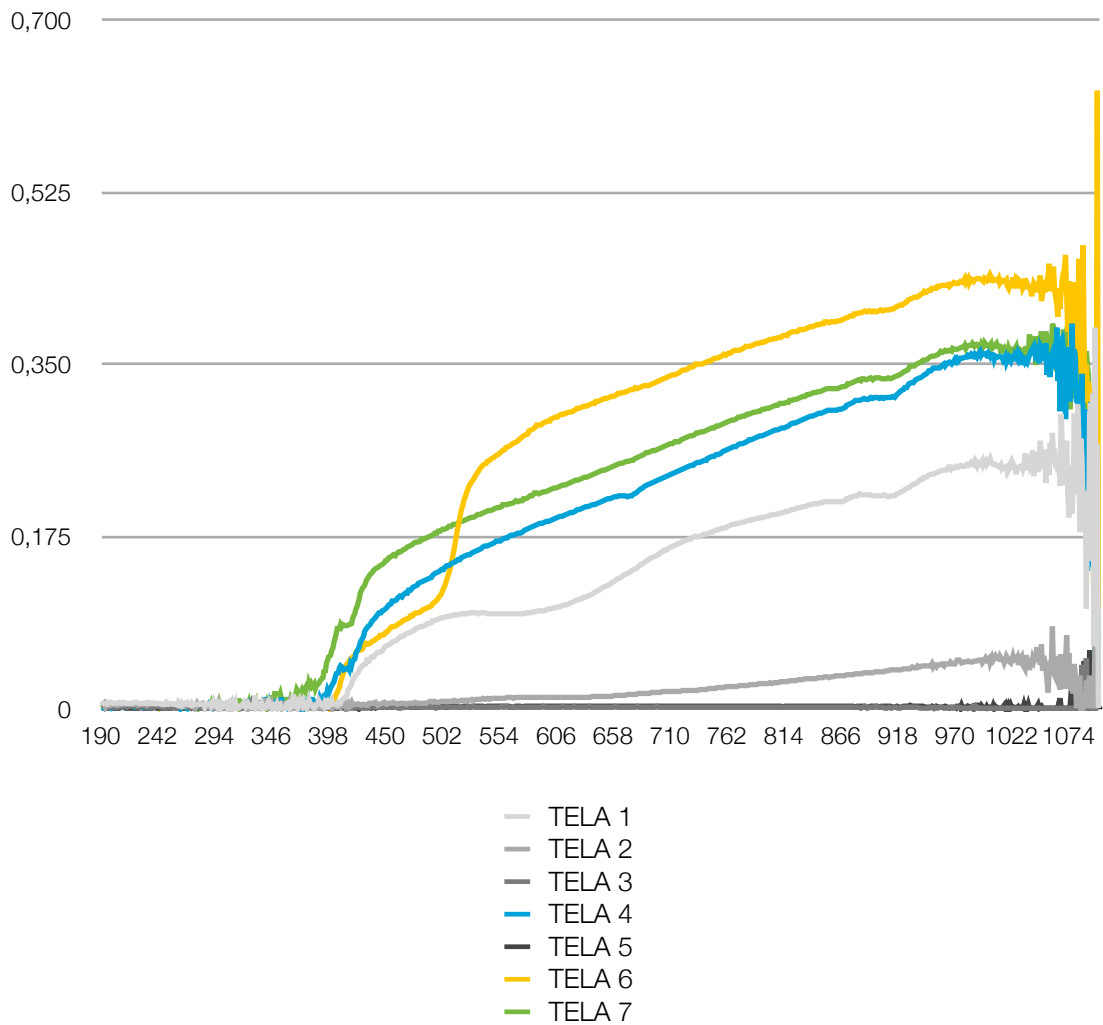
Figura 45. Posición solar para la simulación.

Existen otras variables posibles dentro del software para la creación de simulaciones computacionales, pero no son necesarias en el estudio que actualmente estamos desarrollando, ya que van encaminadas al análisis de diferentes condiciones atmosféricas y a las interacciones entre iluminación solar e iluminación artificial.

## Materiales Textiles

La simulación que vamos a desarrollar se apoya en los datos obtenidos en el laboratorio de Óptica de la Universidad de Granada, sobre el comportamiento ante las distintas longitudes de onda de la luz de un grupo de materiales textiles usados comúnmente en estructuras tensadas. En este ensayo se tomaron mediciones desde los 190 nm hasta los 1100 nm de longitud de onda, en intervalos de 1 nm. Para cada uno de estas longitudes se obtuvo la transmitancia sobre un valor máximo de 1.

De un total de siete materiales textiles ensayados, se ha procedido a realizar la optimización, mediante la simulación computacional de los tres que poseen mayores índices de transmitancia que son los correspondientes a los números 4, 6 y 7 como puede observarse en la *Figura 46*.



*Figura 46.* Gráfica de la transmitancia de los materiales ensayados.

Estos valores de laboratorio son introducidos en el software mediante la utilización de materiales semitransparentes, en los cuales es posible especificar un archivo de absorción de la luz, como puede observarse en la *Figura 47*, que muestra el panel de definición de materiales dentro de Blender.



*Figura 47.* Material utilizado en la simulación de la tela número 6.

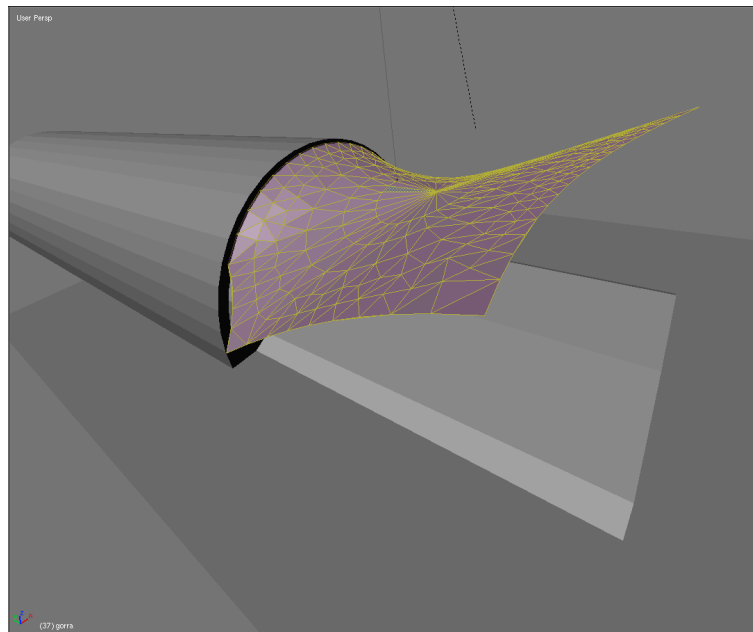
Dicho archivo, consiste en una tabla tabulada en la que aparecen pares de números, siendo el primero el que define la longitud de onda de la luz en nm y el segundo la absorción del material para esta frecuencia. Tomando 1 como valor total de la luz emitida y descontando el correspondiente a la transmitancia para cada frecuencia se obtienen los valores de absorción, que son los que permite el software empleado en la simulación *Figura 48*.

wavelength: nm	data: absorption (1/cm)
190	0,999
191	0,999
192	0,999
193	0,999
194	0,998
195	0,998
196	0,998
197	0,998
198	0,998
199	0,998
200	0,998
201	0,998
202	0,998
203	0,998
204	0,997
205	0,998
206	0,998
207	0,998
208	0,998
209	0,998
210	0,998
211	0,998
212	0,998
213	0,998
214	0,998
215	0,997
216	0,998
217	0,999
.	.
.	.

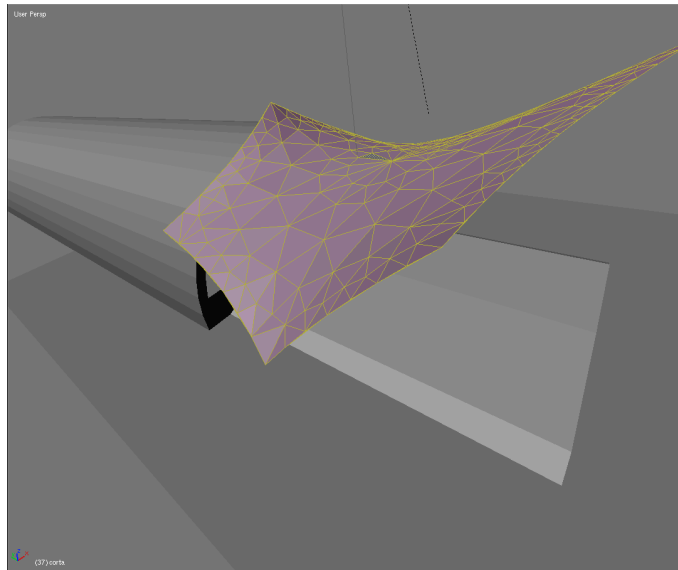
*Figura 48.* Extracto del archivo de absorción de la tela 6.

## Estructuras Tensadas

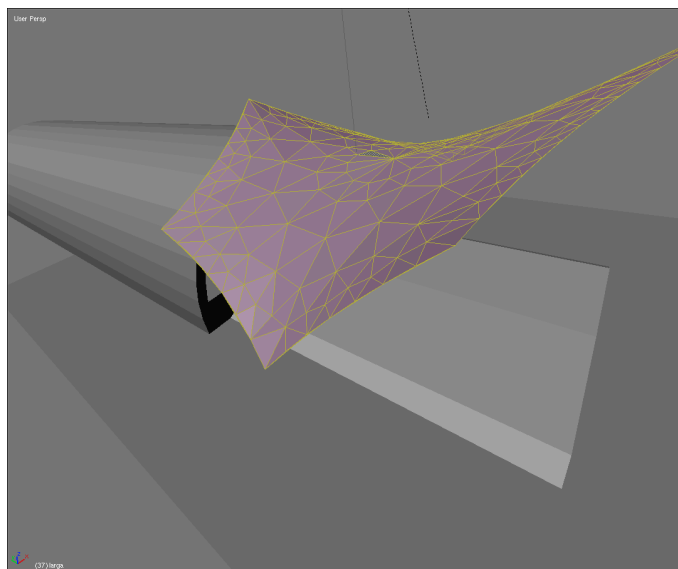
Se han generado 3 modelos de estructuras mediante un algoritmo programado teniendo en cuenta el mallado en topología. En éste, partiendo de los puntos fijos se obtiene una lista de nodos que definen la posición de equilibrio de las estructuras. Esta lista de nodos se introduce en Blender 3D, restituyéndose las mallas poligonales a partir de los mismos. Los tres modelos de carpa tienen diferentes características en cuanto a sus puntos de fijación. El primero se fija en el perímetro de la sección transversal del túnel, mientras que los otros dos, más asimétricos, se fijan sólo en tres puntos por detrás de la entrada del túnel. Las dos últimas estructuras son básicamente la misma forma de equilibrio con la diferencia que en la última, el punto de fijación superior está más atrasado en la entrada del túnel, y la posición de los puntos fijos es ligeramente más alta. El diseño de las tres estructuras, que define la forma de equilibrio de las mismas, está representado en las siguientes Figuras 49, 50 y 51.



*Figura 49.* Modelo computacional “Gorra” en su ubicación para la simulación.



*Figura 50.* Modelo computacional “Corta” en su ubicación para la simulación.



*Figura 51.* Modelo computacional “Larga” en su ubicación para la simulación.

## Renderización de imágenes y toma de medidas

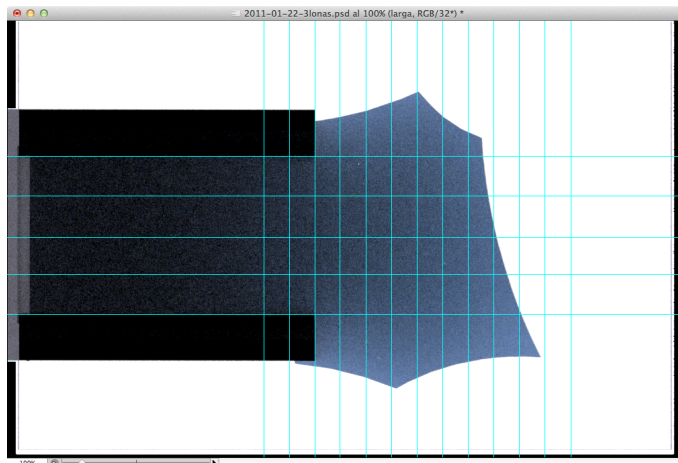
Con los datos anteriores se ha procedido a realizar los renders sobre los que se tomarán las medidas. Para cada uno de los modelos de estructura tensada (Gorra, Corta y Larga) se han generado imágenes combinando materiales y horas.

Obteniéndose un total de 27 imágenes como la mostrada en la siguiente *Figura 52*.



*Figura 52.* Modelo “gorra” a las 14 h del 21 junio, orientación 349,41 N (Pegalajar).

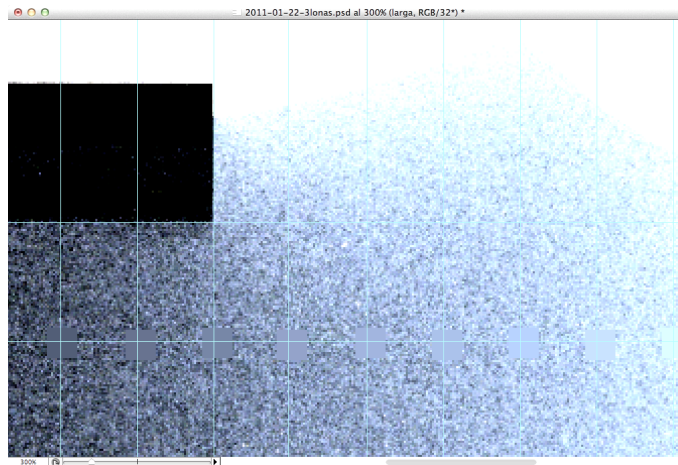
Estos 27 render a 32 bit han sido medidos en intervalos de 1,6 m desde la entrada del túnel. Dos hacia el interior y diez hacia el exterior para cada una de las calzadas de la vía, siguiendo una cuadrícula como puede observarse en la *Figura 53*.



*Figura 53.* Cuadrícula de referencia para la toma de medidas. Ejemplo: Larga 14h.

Debido al carácter probabilístico del método Monte Carlo, los resultados obtenidos sobre la superficie de la vía, poseen un patrón que converge en un

valor, pero que necesita ser promediado. Para ello, se han usado superficies cuadradas de un tamaño equivalente a la superficie que ocuparía el sensor del luxómetro en la maqueta del laboratorio, y se ha obtenido el valor promedio de la iluminación en esa zona, como puede observarse en la imagen en detalle de la *Figura 54*. El valor obtenido dentro de estas superficies es el que se ha tomado como resultado.



*Figura 54.* Detalle de las superficies promediadas sobre las que se han tomado las medidas.

Con los valores obtenidos para cada una de los materiales textiles se han generado las *Tablas 10, 11 y 12*, para las 12:00, 14:00 y 16:00 horas del 21 de junio de 2010. Usando la localización de Pegalajar (Latitud 37.11 N, Longitud 3.35 E) y una orientación de 349.41° N.

En Las siguientes páginas se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los materiales a los que corresponden las siguientes denominaciones comerciales.

Referencia	Denominación
BETA 7038	Tela 4
GAMMA-2 M2 620	Tela 6
BETA 9003	Tela 7



METROS	-3,2	-1,6	0	1,6	3,2	4,8	6,4	8	9,6	11,2	12,8	14,4	16
MAQUETA CM	72	66	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0
gorra-12 derecha	674	864,8	1155	1460	1738	2134	2479	2802	3505	25697	33346	34391	35220
gorra-12 izquierda	646	837,5	1158	1560	1842	2163	2535	3153	3861	32468	33822	34776	35328
corta-12 derecha	721,9	848,9	1216	1618	1952	2224	2557	2915	3633	4270	13569	34010	34811
corta-12 izquierda	724,1	932,8	1266	1553	1920	2168	2522	2956	3594	28262	33463	34402	35272
larga-12 derecha	771,9	1007	1213	1629	1887	2133	2529	2946	3483	4122	4894	33655	34420
larga-12 izquierda	722,2	1042	1305	1696	2031	2233	2540	2876	3546	9639	33164	34077	34890
gorra-14 derecha	679,3	812,9	1135	1454	1783	2074	2391	2979	3532	35537	36655	37709	38384
gorra-14 izquierda	717,2	935,4	1177	1582	1808	2220	2575	3027	3851	35658	36980	37815	38509
corta-14 derecha	708,2	840,6	1174	1456	1822	2116	2593	2981	3622	4289	36239	37123	37933
corta-14 izquierda	670,6	928,1	1214	1554	1833	2113	2448	3014	3727	35499	36632	37529	38231
larga-14 derecha	743,0	1017	1307	1625	1955	2283	2372	2954	3432	4199	35888	36716	37626
larga-14 izquierda	766,7	997,9	1217	1675	1961	2118	2479	2876	3647	35301	36352	37242	38007
gorra-16 derecha	658,8	827	1185	1424	1589	1986	2362	2902	2558	9485	31879	33060	33622
gorra-16 izquierda	650	903,8	1236	1474	1810	2084	2517	3081	3854	4724	32230	33132	33941
corta-16 derecha	608,6	888,9	1176	1491	1861	2344	2621	3124	3698	4313	31550	32505	33313
corta-16 izquierda	744,1	938,5	1270	1462	1829	2277	2575	3025	3787	22961	32035	33073	33741
larga-16 derecha	791,3	932,4	1248	1632	1945	1308	2542	2842	3364	4125	31428	32134	33117
larga-16 izquierda	827,6	1041	1323	1633	1911	2186	2379	2931	3604	7096	31691	32747	33386

Tabla 10. Mediciones para la Tela 4.

METROS	-3,2	-1,6	0	1,6	3,2	4,8	6,4	8	9,6	11,2	12,8	14,4	16
MAQUETA CM	72	66	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0
<b>gorra-12 derecha</b>	835,5	1081	1301	1818	2142	2487	3076	3833	4384	24663	33901	34932	35491
<b>gorra-12 izquierda</b>	841,6	1107	1521	1908	2264	2722	3369	4029	4618	33238	34140	35025	35579
<b>corta-12 derecha</b>	843,6	1304	1689	2023	2488	2818	3372	4048	4596	5403	10434	34627	35124
<b>corta-12 izquierda</b>	895,1	1237	1545	2138	2457	2828	3242	3840	4630	31010	34066	35013	35544
<b>larga-12 derecha</b>	1041	1404	1912	2248	2642	3116	3465	3882	4559	5180	6033	34227	35059
<b>larga-12 izquierda</b>	1029	1299	1812	2151	2641	2828	3361	4055	4762	15968	33881	34747	35410
<b>gorra-14 derecha</b>	779,4	998,9	1347	1707	2053	2573	3192	3667	4456	35994	37167	37998	38727
<b>gorra-14 izquierda</b>	890,8	1131	1542	1863	2349	2873	3491	4025	4814	36350	37548	38288	38898
<b>corta-14 derecha</b>	856,9	1160	1725	1939	2496	2937	3399	3878	4585	5397	36780	37654	38495
<b>corta-14 izquierda</b>	879,1	1280	1798	2150	2527	2767	3226	3981	4609	36200	37176	38066	38535
<b>larga-14 derecha</b>	1025	1372	1827	2193	2579	2979	3412	3947	4461	5234	36605	37492	38020
<b>larga-14 izquierda</b>	1024	1357	1817	2275	2582	2899	3346	3777	4632	36012	37005	37976	38580
<b>gorra-16 derecha</b>	795,3	1033	1293	1704	1989	2500	3034	3686	4542	15908	32546	33551	34081
<b>gorra-16 izquierda</b>	776,7	1057	1462	1932	2375	2704	3352	4079	4684	5835	32900	33626	34328
<b>corta-16 derecha</b>	865,3	1301	1661	2214	2542	2918	3417	3877	4688	5348	32160	33165	33844
<b>corta-16 izquierda</b>	929,7	1292	1656	2102	2529	2803	3409	3991	4649	27184	32578	33350	34103
<b>larga-16 derecha</b>	1027	1410	1699	2212	2686	2941	3476	3913	4493	5198	32003	32919	33610
<b>larga-16 izquierda</b>	1061	1375	1804	2328	2696	3103	3393	4069	4576	12850	32471	33341	33859

Tabla 11. Mediciones para la Tela 6.

<b>METROS</b>	<b>-3,2</b>	<b>-1,6</b>	<b>0</b>	<b>1,6</b>	<b>3,2</b>	<b>4,8</b>	<b>6,4</b>	<b>8</b>	<b>9,6</b>	<b>11,2</b>	<b>12,8</b>	<b>14,4</b>	<b>16</b>
<b>MAQUETA CM</b>	<b>72</b>	<b>66</b>	<b>60</b>	<b>54</b>	<b>48</b>	<b>42</b>	<b>36</b>	<b>30</b>	<b>24</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
<b>gorra-12 derecha</b>	863,4	1085	1403	1720	2147	2615	3071	3830	4475	23426	34107	35193	35635
<b>gorra-12 izquierda</b>	741	1049	1508	1810	2300	2789	3347	3952	4771	33339	34302	35063	35662
<b>corta-12 derecha</b>	900,2	1176	1786	2011	2584	2959	3513	4082	4810	5559	12309	34769	35431
<b>corta-12 izquierda</b>	1050	1250	1720	2089	2482	2859	3410	4052	4794	32555	34353	35156	35619
<b>larga-12 derecha</b>	970,7	1302	1898	2306	2770	3026	3545	4026	4730	5320	6081	34673	35220
<b>larga-12 izquierda</b>	1017	1292	1808	2304	2694	2923	3429	4031	4780	14342	34227	35045	35649
<b>gorra-14 derecha</b>	792,7	1094	1397	1760	2181	2717	3235	3911	4564	36343	37383	38291	38865
<b>gorra-14 izquierda</b>	851	1087	1488	1956	2427	2896	3323	4119	4768	36666	37823	38414	38972
<b>corta-14 derecha</b>	974,3	1256	1668	2163	2553	3018	3381	4043	4690	5867	37114	37989	38618
<b>corta-14 izquierda</b>	863,3	1260	1671	2181	2572	2922	3287	3937	4654	36488	37552	38446	38830
<b>larga-14 derecha</b>	966,9	1296	1782	2125	2614	3013	3555	4169	4739	5425	37099	37731	38471
<b>larga-14 izquierda</b>	975	1323	1889	2250	2651	2954	3510	4011	4625	36331	37268	38167	38793
<b>gorra-16 derecha</b>	871,4	1039	1342	1731	2148	2630	3182	3867	4725	14315	32868	33566	34001
<b>gorra-16 izquierda</b>	825,1	1067	1508	1933	2303	2742	3399	4084	4768	5770	32995	33924	34327
<b>corta-16 derecha</b>	891,2	1160	1625	2156	2534	2991	3359	4110	4660	5605	32483	33368	34038
<b>corta-16 izquierda</b>	935,8	1267	1756	2212	2640	2748	3323	3952	4814	27408	32902	33644	34257
<b>larga-16 derecha</b>	997,1	1385	1771	2181	2538	3094	3413	4044	4747	5184	32357	33155	33880
<b>larga-16 izquierda</b>	1068	1361	1815	2330	2784	3025	3449	3955	4724	13069	32626	33516	34241

Tabla 12. Mediciones para la Tela 7.

Dado que en España se circula por el carril derecho de la calzada la mayoría de los vehículos usaran la entrada derecha del túnel, por ello en este trabajo, sólo se han considerado los resultados correspondientes a este carril. Las medias de iluminancia y de ahorro energético en la iluminación de la vía bajo las estructuras tensadas, se muestran en las siguientes *Tablas 13, 14 y 15* para cada uno de los materiales en los horarios más críticos (12:00h, 14:00h, 16:00h). En estas tablas, el ahorro energético para cada estructura tensada, se ha obtenido dividiendo la media de los resultados obtenidos con el software de simulación entre la iluminancia teórica calculada.

Los valores teóricos requeridos de luminancia en el zona umbral del túnel han sido calculados con el método  $L_{20}$ . Este método consiste en el cálculo de la luminancia en un cono de  $20^\circ$  en la puerta de entrada del túnel. El valor es la suma de los valores de luminancia del cielo  $L_S$ , la vía  $L_R$ , los elementos del entorno  $L_B$  y la zona circundante  $L_M$ . Proporcionados dentro del cono.

$$L_{20} \approx \gamma L_S + \rho L_R + m L_M + b L_B \quad (7)$$

$$\gamma + \rho + m + b = 1 \text{ (100\%)}$$

De acuerdo con CIE 88, La relación entre  $L_{20}$  y  $L_{th}$  para este túnel, en el cual la velocidad máxima es de 100 Km/h ha de ser  $L_{th} / L_{20} = 0.08$ .

Conociendo la importancia de la luminancia requerida en la zona umbral se han adoptado los valores de corrección  $\rho = 0.25$ ,  $b = 0.8$  y  $\gamma = 0.8$  para una aproximación más realista a la iluminación objeto de este estudio. Con estos valores y haciendo uso de la ecuación anterior, se ha obtenido un valor teórico de la iluminación en la puerta de entrada del túnel de  $E_M = 8222 \text{ lux}$ . Este valor será el usado para evaluar el ahorro energético obtenido bajo las estructuras tensadas.

Estructura	Hora	$E_m$ (lux)	Ahorro energético (%)
Gorra	12:00	5121,25	62,3
Corta	12:00	3772,67	45,9
Larga	12:00	2759,56	33,6
Gorra	14:00	6360,63	77,4
Corta	14:00	6254,67	76,1
Larga	14:00	6223,89	75,7
Gorra	16:00	2936,38	35,7
Corta	16:00	5797,56	70,5
Larga	16:00	5603,78	68,2

Tabla 13. Resultados de iluminancia y ahorro energético para las estructuras con el recubrimiento Tela 4.

Estructura	Hora	$E_m$ (lux)	Ahorro energético (%)
Gorra	12:00	5463	66,4
Corta	12:00	4096,8	49,8
Larga	12:00	3670,8	44,6
Gorra	14:00	6873,6	83,6
Corta	14:00	7015,1	85,3
Larga	14:00	7026,3	85,5
Gorra	16:00	4332	52,7
Corta	16:00	6536,1	79,5
Larga	16:00	6513,4	79,2

Tabla 14. Resultados de iluminancia y ahorro energético para las estructuras con el recubrimiento Tela 6.

Estructura	Hora	$E_m$ (lux)	Ahorro energético (%)
Gorra	12:00	5335,9	64,9
Corta	12:00	4401,4	53,5
Larga	12:00	3744,7	45,5
Gorra	14:00	7013,5	85,3
Corta	14:00	7166,3	87,2
Larga	14:00	7169	87,2
Gorra	16:00	4242,5	51,6
Corta	16:00	6613,7	80,4
Larga	16:00	6592,1	80,2

*Tabla 15.* Resultados de iluminancia y ahorro energético para las estructuras con el recubrimiento Tela 7.

De los datos anteriores se desprende que el resultado del ahorro energético para cada una de las estructuras tensadas varía con la hora, y más concretamente con la posición del sol, por ello se han calculado las medias de las tres horas analizadas (12:00, 14:00 y 16:00) mostrándose en la *Tabla 16* los resultados para cada uno de los diseños en combinación con cada uno de los diferentes materiales.

Estructura	S Tela 4 %	S Tela 6 %	S Tela 7 %
Gorra	58,5	67,6	67,3
Corta	64,2	71,5	73,7
Larga	59,2	69,8	71,0

*Tabla 16.* Medias de los ahorros energéticos para cada estructura y material en %.

Para unas luminarias típicas de 48000 lm y 400W, el consumo energético medio anual en la zona umbral del túnel es de 98,11 MWh. Mediante la ecuación ESTS se puede calcular el ahorro energético de cada estructura tensada por año. En la *Tabla 17* se muestran los ahorros energéticos anuales obtenidos para un promedio de 8 horas de luz solar.

Estructura	Ahorro energético Tela 4 (MWh)	Ahorro energético Tela 6 (MWh)	Ahorro energético Tela 7 (MWh)
Gorra	4,5	5,2	5,2
Corta	4,9	5,5	5,6
Larga	4,5	5,4	5,4

*Tabla 17.* Medias anuales de los ahorros energéticos para cada estructura y material en MWh.

De la *Tabla 17* se desprende que el ahorro energético obtenido bajo las estructuras es mayor para el modelo "Corta" con el material Tela 7. Esta unión, constituye el binomio óptimo de los analizados usando el método computacional aquí descrito.

# Conclusiones



La forma de la estructura tensada ha demostrado tener gran influencia sobre el ahorro energético cuando ésta se sitúa a la entrada de los túneles con objeto de desplazar la zona umbral. Este desplazamiento posibilita el aprovechamiento de la luz solar para iluminar el primer tramo del túnel.

Sin embargo, cada túnel necesita un estudio particularizado para seleccionar la forma idónea de la estructura, que dependerá de la orientación, la situación geográfica y los alrededores del túnel en estudio. Lo anteriormente expuesto implica que la instalación de estas estructuras requiere de un proceso de optimización particularizado para cada caso.

Dado el enorme coste que supone llevar a cabo estas optimizaciones se presenta una acuciante necesidad de encontrar herramientas fiables, rápidas y económicas que permitan elegir la estructura óptima en base al ahorro energético que su implantación supondría.

La finalidad de este trabajo ha consistido en describir un método computacional que, basado en software libre mediante las herramientas Blender y Luxrender, permita cuantificar el ahorro energético que se obtiene al disponer estructuras tensadas semitransparentes en la entrada de los túneles de carretera. La singularidad de este método estriba en que permite obtener la estructura óptima para cada situación en particular, sin requerir los largos y costosos ensayos necesarios en los túneles reales.

Para el túnel ensayado, Pegalajar (Jaén), se han considerado tres estructuras tensadas distintas, construidas con poliéster pero con tres diferentes recubrimientos. Estos 9 pares (estructura+recubrimiento) se han simulado para tres posiciones solares próximas al solsticio de verano en el hemisferio Norte. Este estudio ha supuesto, pues, 27 ensayos de iluminación sin el coste económico que habrían supuesto llevar a cabo ensayos de campo. Además, este método permite llevar a cabo el estudio comparativo de todas las estructuras para la misma posición solar, lo que obviamente sería materialmente imposible con ensayos de campo.

El resultado obtenido en la simulación computacional, muestra como una de las estructuras analizadas (denominada estructura “corta” en el documento) conduce a un mayor ahorro energético para todos los materiales textiles ensayados. Asimismo se ha comprobado que el óptimo corresponde a la combinación de esta estructura con la Tela 7 (BETA 9003).

El estudio llevado a cabo en esta tesis ha puesto de manifiesto que la forma de la estructura tensada tiene mayor influencia en el ahorro energético que el material textil empleado.

Los resultados de la calibración del modelo computacional han demostrado que Blender es una excelente herramienta para seleccionar la forma y material óptimos de una estructura tensada instalada a la entrada de un túnel de carretera.

### **Futuras Líneas de Investigación**

Los resultados obtenidos en este trabajo han abierto nuevas líneas de investigación respecto del ahorro energético en túneles, que a continuación se exponen sucintamente:

- Empleo de materiales electrocrómicos, capaces de modificar su opacidad, como material textil de la estructura.
- Disposición de pérgolas a la entrada de los túneles, como método alternativo a las estructuras tensadas.
- Combinación de distintos sistemas estudiados para reducir al máximo el consumo energético en el primer tramo de túneles de carretera.

# Publicaciones y Comunicaciones generadas por la tesis

Peña-García, A.; Gil-Martín, L. M.; Escribano, R.; Espín-Estrella, A. (2011) “A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving,” *International Journal of Photoenergy*. doi:10.1155/2011/313952.

(En revisión) Peña-García, A.; Escribano, R.; Gil-Martín, L. M.; Espin-Estrella A. (2011) “Computational Optimization of Semi-transparent Tension Structures for the use of Solar Light in Road Tunnel,” *Tunnelling and Underground Space Technology*.

Gil-Martín, L.M.; Peña-García, A.; Escribano, R.; Espín-Estrella, A. (2011), “A computational method to optimize energy savings of tension structures set in road tunnels,” International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'11. Las Palmas de Gran Canaria, España.

Gil-Martín, L.M.; Peña-García, A.; Escribano, R.; Espín-Estrella, A. (2011), “Computational Simulation versus Scale Model to determine the Optimal Shape of Tension Structures for the use of Sunlight in Road Tunnels,” International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'12. Santiago de Compostela, España.

# A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving

Hindawi Publishing Corporation  
International Journal of Photoenergy  
Volume 2011, Article ID 313952, 9 pages  
doi:10.1155/2011/313952

## Research Article

### A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving

Antonio Peña-García,<sup>1</sup> Luisa-María Gil-Martín,<sup>2</sup> Roberto Escribano,<sup>3</sup>  
and Antonio Espín-Estrella<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, ETSICCP, University of Granada, 18071 Granada, Spain

<sup>2</sup>Department of Structural Mechanics, ETSICCP, University of Granada, 18071 Granada, Spain

<sup>3</sup>Department of Graphical Expression in Architecture and Engineering, ETSIE, University of Granada, 18071 Granada, Spain

Correspondence should be addressed to Antonio Peña-García, pgarcia@ugr.es

Received 25 May 2011; Revised 30 June 2011; Accepted 13 July 2011

Academic Editor: Jimmy Yu

Copyright © 2011 Antonio Peña-García et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Shifting the threshold zone of road tunnels with semitransparent tension structures has shown itself to be an effective way of saving energy in regards to electricity consumption, maintenance, and construction materials used in the electrical lighting, thus lessening negative environmental impacts. Even though the shape of the tension structure has a major influence on energy savings, the optimal type of structure for each tunnel is often difficult to determine, because experiments using real tunnels are extremely expensive. It is thus necessary to find methods of doing this that are both reliable as well as economical. In this research study, three candidate structures were set up at the portal of a scale model of a real tunnel. The energy savings in each case were analyzed and compared. As a result, it was possible to formulate a new equation that calculates the energy savings in the threshold zone.

## 1. Introduction

Road tunnels are divided into various zones for lighting purposes. Depending on the distance of these zones from the entrance or to the exit of the tunnel, they have different requirements for luminance,  $L$  (luminous flux emitted per unit of surface and solid angle in a given direction) and illuminance,  $E$  (luminous flux received per unit of surface). A great deal of research has focused on the best way to calculate both luminance and illuminance in road tunnels [1–4], and there are important contributions still being made in this area [5].

These road tunnel zones are the following: (i) *access zone* (the opencast sky zone just before the beginning of the tunnel), (ii) *threshold zone* (the first section of the tunnel), (iii) *transition zone* (the section after the threshold zone), (iv) *interior zone* (the inner section of the tunnel), and (v) *exit zone* (the last section before the tunnel ends). A more detailed description of road tunnel zones can be found in [4].

Figure 1 shows that the threshold zone ( $L_{th}$ ) requires more light than any other section of the tunnel. This means

that energy consumption in this section can be extremely high, especially in tunnels where electrical lighting operates 24 hours a day and 365 days a year.

For this reason, a major priority is to reduce energy consumption in the threshold zone, but without negatively affecting the visual capacity of drivers and reducing traffic safety. An effective way of attaining this goal is to shift the threshold zone outside of the tunnel. This affords the possibility of collecting and using sunlight to reach the required illuminance levels instead of doing this solely with electrical lighting. For this purpose, semitransparent tension structures have proven to be an effective solution as shown in other studies [6, 7]. However, these studies only focused on showing the value of tension structures as an energy-saving mechanism in road tunnels and did not analyze how they could be optimized.

Permanent tension structures have the advantage of being aesthetic, light-weight, flexible, durable, and easy to construct. If they are properly installed, the fabric and auxiliary components will have a useful service life of 30 years

## (En revisión) “Computational Optimization of Semi-transparent Tension Structures for the use of Solar Light in Road Tunnel”

Elsevier Editorial System(tm) for Tunnelling and Underground Space Technology  
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: COMPUTATIONAL OPTIMIZATION OF SEMI-TRANSPARENT TENSION STRUCTURES FOR THE USE OF SOLAR LIGHT IN ROAD TUNNELS

Article Type: Research Paper

Section/Category: Tunnelling

Keywords: Road tunnel, Lighting, Tension structures, Energy savings, Graphical design

Corresponding Author: Prof. Antonio Peña-García, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: University of Granada

First Author: Antonio Peña-García, Ph.D.

Order of Authors: Antonio Peña-García, Ph.D.; Roberto García-Escribano, M.Eng.; Luisa-María Gil-Martin, Ph.D.; Antonio Espín-Estrella, Ph.D.

Abstract: The installation of semi-transparent tension structures in the entrance portal of road tunnels leads to significant energy savings. These savings can be maximized when the tensions structures are designed in such a way that their material and shape contribute to their optimal photometric and mechanical performance. In this research, it has been used a graphic design software in the field of light simulation, combined with the ESTS equation, developed in a previous study, to simulate tension structures with three different shapes and three different materials. Nine possible combinations were thus tested. The results obtained show that this new method is a quick, inexpensive, and safe way to optimize the material and shape of the tension structure installed at the entrance portal of a road tunnel, regardless of its orientation and location.

# ICREPQ'11 “A computational method to optimize energy savings of tension structures set in road tunnels”

European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ)

International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)  
Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011

## A computational method to optimize energy savings of tension structures set in road tunnels

L.M. Gil-Martín<sup>1</sup>, A. Peña-García<sup>2</sup>, R. Escribano<sup>3</sup> and A. Espín-Estrella<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Structural Mechanics.  
ETSICCP, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 249 962, e-mail: [mlgil@ugr.es](mailto:mlgil@ugr.es)

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering.  
ETSICCP, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 249 435, e-mail: [pgarcia@ugr.es](mailto:pgarcia@ugr.es), [aespin@ugr.es](mailto:aespin@ugr.es)

<sup>3</sup>Department of Graphical Expression in Architecture and Engineering.  
ETSIE, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 243 115, e-mail: [rogaes@ugr.es](mailto:rogaes@ugr.es)

E-mail to: [pgarcia@ugr.es](mailto:pgarcia@ugr.es)

**Abstract.** After the successful introduction of transparent tension structures in the portal of road tunnels as an effective measure for energy savings, optimization of such savings has been sought. A computational method based on graphical design capable to simulate, on one hand the optical properties of the sun and any tension structure and tunnel in the world, has been developed and presented in this paper. A comparison with measurements in a real tension structure placed in the entrance portal of one real tunnel is performed and discussed.

### Keywords

Energy Saving, Solar Radiation, Graphical Design, Electrical Lighting, Road Safety.

### 1. Introduction

Road tunnel lighting is one of the most complex problems when dealing with electrical lighting [1, 2]. Furthermore, in addition to the difficulty of implementing accurate solutions to ensure the correct visibility inside road tunnels (which is a really hard task due to the high variability between the visual systems of drivers), we find that the energetic requirements of tunnel lighting are extremely high because it is

necessary that the driver visual system does not suffer any important change in levels of illuminance when going into these structures.

In previous works [3, 4], we demonstrated that implementation of transparent tension structures in the portal of road tunnels could be a very effective and easy measure to use the sunlight during daytime, which is the most critical period of the day when dealing with tunnel lighting. Nevertheless, the advances above were carried out with very simple tension structures because the target was to prove whether they were reliable and profitable.

Furthermore, any test to prove the effectiveness of these structures or look for optimal ones, should be carried out in real tunnels, which, besides the risks for safety, required huge investments in money, human efforts and legal bureaucracy.

Hence, the search of an effective tool to optimize the structures and energy savings in each different condition without going to tests in real tunnels became the main objective of this line of research. One tool, that can determine which tension structure is better for each tunnel, will allow us to set such structures in every

# ICREPQ'12 “Computational Simulation versus Scale Model to determine the Optimal Shape of Tension Structures for the use of Sunlight in Road Tunnels”



European Association for the  
Development of Renewable Energies, Environment  
and Power Quality (EA4EPQ)

International Conference on Renewable Energies and Power Quality  
(ICREPQ'12)  
Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012

## Computational Simulation versus Scale Model to determine the Optimal Shape of Tension Structures for the use of Sunlight in Road Tunnels

L.M. Gil-Martin<sup>1</sup>, A. Peña-García<sup>2</sup>, R. Escribano<sup>3</sup> and A. Espin-Estrella<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Structural Mechanics.  
ETSICCP, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 249 962, e-mail: [mlgil@ugr.es](mailto:mlgil@ugr.es)

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering.  
ETSICCP, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 249 435, e-mail: [pgarcia@ugr.es](mailto:pgarcia@ugr.es), [aespin@ugr.es](mailto:aespin@ugr.es)

<sup>3</sup>Department of Graphical Expression in Architecture and Engineering.  
ETSIE, University of Granada.  
Campus Fuentenueva – 18071 Granada (Spain)  
Phone number: +34 958 243 115, e-mail: [rogas@ugr.es](mailto:rogas@ugr.es)

**Abstract.** Placement of semi-transparent tension structures in the portal gate of road tunnels to shift their threshold zone and use sunlight, has been proved to be an interesting procedure to save electrical energy. However, in order to obtain the maximum performance, the shape of the structure has to be established for each tunnel, depending on its geographic location, orientation and surroundings. In previous works, computational methods and a scale model have been used to determine the optimal shape of these structures without expensive and time costing trials. In this work, comparison of the results is presented and it shows that the virtual modeling combined with the previously derived ESTS equation can be used to choose of the most convenient structure.

### Key words

Road tunnel, Lighting, Tension structures, Energy savings, Graphical design.

### 1. Introduction

It is known that the eye adaptation from bright to dark environments needs a quite long period of time that may take a minimum of eight minutes. Figure 1 represents the dark adaptation curve as a function of the time in dark.

This period of dark adaptation is unfeasible in driving, where one single second of delay or inaccurate visual performance implies a huge risk for the safety of the drivers. For this reason road tunnels need a more powerful

lighting during daytime so that the driver eye does not lose any performance when going into them.

Regarding lightning, road tunnels are divided into several zones depending on the road and walls luminance supplied by the electrical lighting needed for a safe driving according to CIE Publ. 88, 2004 [2]. The luminance in the threshold zone (that is extended from the portal towards the interior of the tunnel),  $L_{th}$ , is the most important parameter in the lighting of tunnel in order to allow the drivers adaptation from the very bright environment to the relative darkness inside the tunnel.

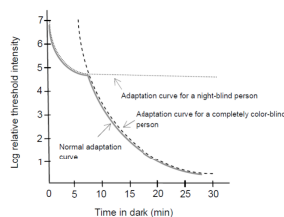


Fig. 1. Adaptation curve from bright to dark environments. Adapted from [1].

In this zone the required luminance is the highest in the whole tunnel, so any way to achieve  $L_{th}$  in this zone by

# Bibliografía



- 1 Adrian, W. (1982), "Investigations on the required luminance in tunnel entrances," *Lighting Res. Technol.*, 14, 151–159.
- 2 Schreuder, D. A. (1971), "Tunnel entrance lighting: a comparison of recommended practice," *Lighting Res. Technol.*, 3, 274–278.
- 3 Gil-Martín, L.M.; Peña-García, A.; Hernández-Montes, E.; Espín Estrella, A. (2011), "Tension Estructuras: A way towards sustainable lighting in road tunnels," *Tunneling and Underground Space Technology*, 26, 223-227.
- 4 Peña-García, A.; Gil-Martín, L.M.; Espín-Estrella, A.; Aznar-Dols, F. (2010), "Energy saving in road tunnels by means of transparent tension Estructuras," International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'10. Granada (Spain). ISBN: 978-84-613-7543-1.
- 5 Commission International de l'Éclairage (CIE) (2004), "Guide for the lighting of road tunnels and underpasses," CIE Publ. 88, 2nd Ed, Vienna.
- 6 Fanlo-Montes, J. M.; Galí-Cavaller, F. (2011), "Estudio de las necesidades de iluminación de túneles: análisis de normativas y contrastes en situaciones reales," XXXVII Simposium Nacional de Alumbrado, Santander.
- 7 Simons, R.H.; Bean, A.R. (2001), "Lighting Engineering: Applied Calculations," Elsevier, Oxford.
- 8 Chilton, J.; Blum, R. (2004), "Internal Environment," *European Design Guide for Tensile Surface Estructuras*, 1, 98-146, Tensinet, Ed.
- 9 Otto, F. (1967), "Tensile Estructuras; design, Estructura, and calculation," 1, 2, 1973, c1967, c1969 ed: The MIT Press.
- 10 Day, A. S. (1965), "An introduction to Dynamic Relaxation," *The Engineer*.
- 11 Barnes, M. (1977), "Form Finding and Analysis of Tension Estructuras by Dynamic Relaxation," Ph.D thesis, The City University, London.
- 12 Wakefield, D. S. (1980), "Pretensioned Networks Supported by Compression Arches," Ph.D, thesis, The City University, London.
- 13 Day, A. S.; Bunce, J. (1969), "The Analysis of Hanging Roofs," *Arup Journal*.

- 14 Linkwitz, K.; Shek, H. J. (1971), "Einige Bemerkung von vorsgepannten Seilnetzkonstruktionen," *Ingenieur-archiv*, 40, 145–158, Springer, Berlin.
- 15 Schek, H. J. (1974), "The force density method for form finding and computation of general networks," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, 115–134.
- 16 Haber, R. B.; Abel, J. F. (1982a), "Initial equilibrium solution method for cable reinforced membranes. Part I: Formulations," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 30, 263–284.
- 17 Haber, R. B.; Abel, J. F. (1982b), "Initial equilibrium solution method for cable reinforced membranes. Part II: Implementation," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 30, 285–306.
- 18 Levy, R.; Spillers, W. R. (1998), "Practical methods of shape finding for membranes and cable nets," *J. Struct. Eng.*, 124(4), 466–468.
- 19 Barnes, M. R. (1999), "Form finding and analysis of tension Estructuras by dynamic relaxation," *Int. J. Space Struct.*, 14(2), 89–104.
- 20 Hernández-Montes, E.; Jurado-Piña, R.; Bayo, E. (2006), "Topological mapping for tension Estructuras," *J. Struct. Eng. ASCE* 132 (6) 970– 977.
- 21 Parise, G.; Martirano, L.; Pierdomenico, S. (2007), "An adaptive criterion to design the lighting system in the road tunnels," in Proceedings of the 42nd IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 1244– 1248.
- 22 Sutherland, I. E. (1963), "Sketchpad: A man-machine graphical communication system," *Technical Report No. 296*, Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology.
- 23 Goral, C.; Torrance, K.E.; Greenberg D.P.; Battaile, B. (1984), "Radiosity . Modeling the interaction of light between diffuse surfaces," *Computer Graphics, SIGGRAPH '84*, 18 (3), 213–222.
- 24 Kajiya, J. (1986), "The rendering equation," *Computer Graphics, SIGGRAPH '86*, 20 (4), 143–150]. doi:10.1145/15922.15902

- 25 Nicodemus, F. (1965), "Directional reflectance and emissivity of an opaque surface," (abstract). *Applied Optics* 4 (7): 767–775. Bibcode ApOpt 4 767N. doi:10.1364/AO.4.000767.
- 26 Bouknight, W. J. (1970), "A procedure for generation of three-dimensional half-tone computer graphics presentations," *Communications of the ACM* 13 (9), 527–536 doi:10.1145/362736.362739
- 27 Whitted, T. (1980), "An improved illumination model for shaded display," *Communications of the ACM* 23 (6), 343–349.
- 28 Miller, G.S.; C.R. Hoffman. (1984), "Illumination and Reflection Maps: Simulated Objects in Simulated and Real Environments," Course Notes for Advanced Computer Graphics Animation. New York: Association for Computing Machinery Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Computer Graphics.
- 29 Debevec, P.; Malik. J. (1997), "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," Association for Computing Machinery Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques International Conference, 369-378, New York: ACM Press/Addison-Wesley.
- 30 Debevec, P. (1998), "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography," Association for Computing Machinery Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques 98 International Conference, 189-198 New York: ACM Press/Addison-Wesley.
- 31 Metropolis, N.; Ulam, S. (1949), "The Monte Carlo Method," *Journal of the American Statistical Association*, 44, 247: 335–341. doi:10.2307/2280232. JSTOR 2280232. PMID 18139350
- 32 Veach, E.; Guibas, L. (1997), "Metropolis light transport," *Computer Graphics SIGGRAPH '97*, 16, 65–76.
- 33 Pharr, M.; Humphreys, G. (2010), "Physically Based Rendering: From Theory to Implementation," Morgan Kaufmann, Ed. second edition.

UNIVERSIDAD DE GRANADA

