

Parte 3 Simulación y Análisis

3.1.	Herramientas de simulación	193
3.1.1.	Modelos de simulación de la luz	193
3.1.2.	Programas de simulación fotométrica	206
3.1.3.	Requisitos físicos.	208
3.1.4.	Requisitos de usuario	210
3.2.	Validación	213
3.2.1.	Modelo y parámetros generales.	213
3.2.2.	Análisis de la continuidad física.	217
3.2.3.	Análisis de la resolución de imagen.	223
3.2.4.	Análisis de la resolución de la geometría.	229
3.2.5.	Análisis de la saturación lumínica.	236
3.2.6.	Estudio de un caso publicado.	238

3.1. Herramientas de simulación.

Para calcular comportamiento de la reflexión de los rayos en las superficies y por tanto comprobar si se pueden producir fenómenos de *rayos de la muerte* hemos recurrido a herramientas de simulación de la luz. A la hora de elegir qué herramienta utilizar y qué parámetros van a ser determinantes en la investigación es necesario conocer cómo funcionan los distintos modelos de simulación.

3.1.1. Modelos de simulación de la luz.

A pesar de conocer el comportamiento de la luz, a la hora de llevarlo a la práctica en una simulación por ordenador hay muchas cuestiones que tener en cuenta. El principal problema que se presenta es cómo conseguir realizar una simulación completamente realista y físicamente precisa con los medios de computación que tenemos. Un claro ejemplo se presenta en la simulación de un espacio exterior. El sol emite infinitos rayos de luz en todas direcciones, pero solo unos pocos de ellos llegarán a la escena que queremos tratar. Si calculásemos todos los rayos para posteriormente discernir cuáles afectan a nuestra escena gastaríamos una ingente e innecesaria potencia de cálculo, lo que conlleva gasto energético y de tiempo. Si además sumamos los efectos de las aberraciones ópticas, el cálculo sería descomunal. Por tanto, a la hora de afrontar una simulación, cualquier programa de renderizado debe ser capaz de solventar este problema de computación.

Problemas principales de la simulación y el renderizado por ordenador son la determinación de la posición relativa de los objetos en la escena, la precisión física del comportamiento de la

luz, la definición correcta de las propiedades de los materiales, los tratamientos posteriores de la imagen y la velocidad de cálculo, este último siendo un tema en gran auge en la actualidad debido a la importancia del renderizado en tiempo real para la industria de los videojuegos.

Todos estos problemas se han ido abordando con diversas aproximaciones desde la década de 1970 hasta la actualidad, constituyendo un amplio campo de estudio e involucrando a muchos sectores desde la ingeniería y la arquitectura hasta las industrias del cine y los videojuegos. Todo ello está propiciando gran cantidad de avances en el campo, obteniendo resultados realmente impactantes en la actualidad.

El comportamiento de la luz. *Ray-tracing*.

Desde los inicios de la computación gráfica, uno de los objetivos buscados dentro de este campo ha sido el de la generación de imágenes lo más realistas posibles. Para lograr este objetivo es fundamental una simulación correcta del comportamiento de la luz. El renderizado es el proceso encargado de la generación de imágenes realistas extraídas a través de escenas generadas por ordenador. Dentro de esta materia el trazado de rayos o *ray-tracing* se ha convertido en una herramienta fundamental para el cálculo de la luz.

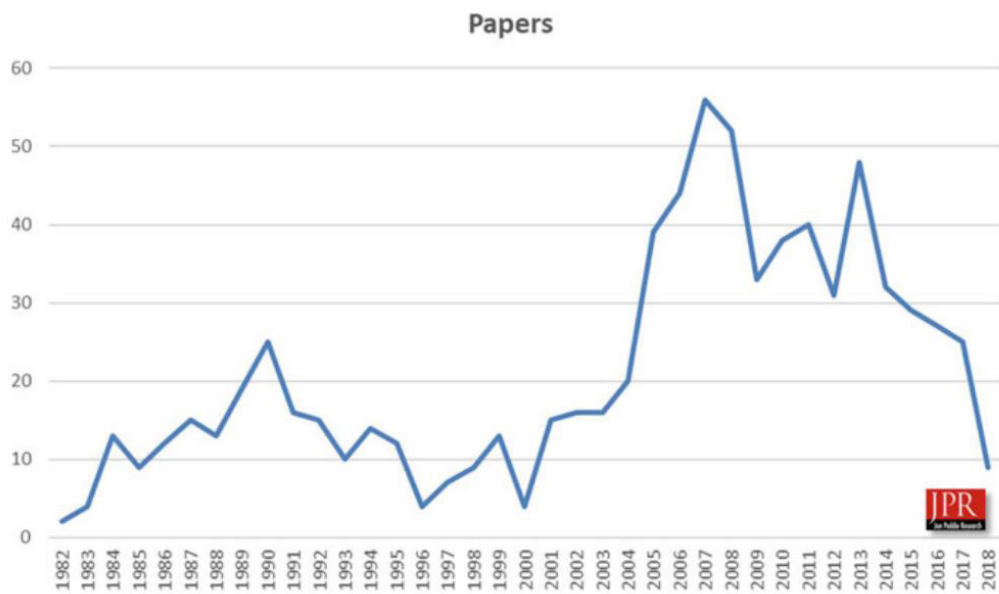
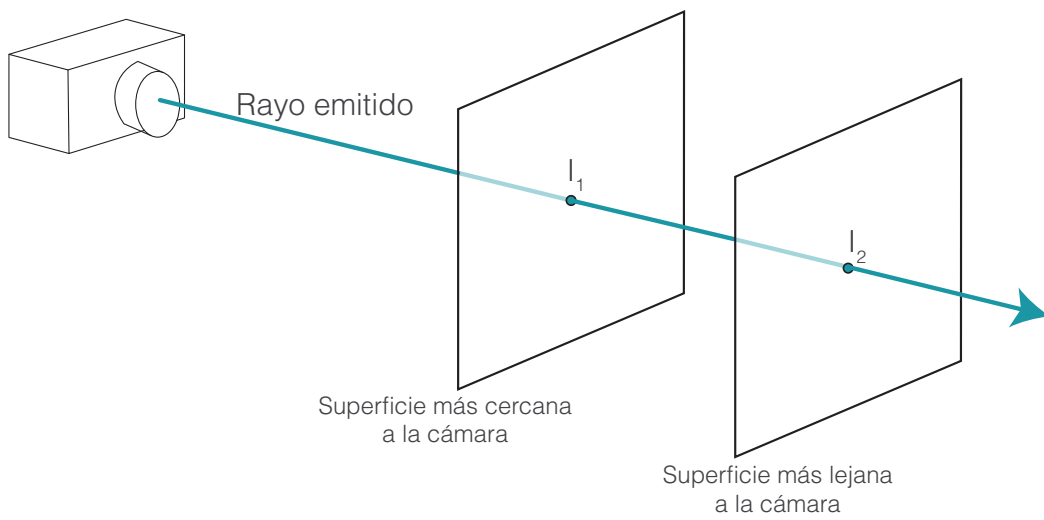
Breve historia del ray-tracing.

En 1968, Arthur Appel publicó un artículo titulado *Some techniques for shading machine renderings of solids* en el que analizaba diferentes experimentos para la generación automática de sombras en imágenes de líneas (Appel 1968). Este artículo se considera el precursor del *ray-casting* o método de intersección de rayos con superficies en la visualización de gráficos.

Posteriormente, en 1979, en la *6th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* se presentó un artículo por Turner Whitted (1979) en donde se trata una metodología basada en el trazado de rayos para el cálculo de la iluminación global. Describe cómo se asocia un valor a cada píxel de la imagen atendiendo al comportamiento de los rayos asociados a dicho píxel. De esta forma se describe la metodología empleada en el *ray-tracing*. Esta técnica recursiva del trazado de rayos presentada produce una importante precisión en los fenómenos de refracción y reflexión (Haines y Akenine-Möller 2019) que no habían sido tratados por Appel.

Uno de los principales problemas al aplicar una técnica de trazado de rayos es la determinación de la posición relativa de los planos que conforman la escena entre sí, de forma que el rayo interactúe correctamente con los sólidos, encontrando el plano más cercano al rayo emitido (Haines y Akenine-Möller 2019). De ello se encarga la técnica del *ray-casting*, que por distintos algoritmos y técnicas analiza la posición de las superficies que componen la escena y su posterior interacción con la luz. Para ello, el *ray-casting* determina la intersección de un rayo con las distintas superficies de la escena. A continuación, analiza la posición de dichas intersecciones para determinar la posición relativa de todas las superficies y así representar aquella que se encuentre más cerca del espectador (Fig. 3.1). En 1982 Scott D. Roth publicó un artículo en el que presentaba esta técnica (Roth 1982).

En 1984, la técnica del *ray-tracing* ya estaba aceptada y extendida. Sin embargo, algunos fenómenos ópticos todavía no habían sido resueltos o lo habían hecho solo parcialmente. Dentro de este proceso de desarrollo se situó la publicación *Distributed ray*



tracing (Cook, Porter, y Carpenter 1984), donde se desarrolla una solución para los fenómenos como el desenfoque por movimiento, la profundidad de campo, penumbras, transparencias y reflejos difusos, gracias al *stochastic ray-tracing* o trazado de rayos estocástico. Y es que precisamente, para obtener unos mejores resultados es preciso recurrir a técnicas estocásticas.

Desde 1982 hasta la actualidad, el campo del *ray-tracing* ha seguido avanzando consiguiendo importantes mejoras y resultados muy pulidos. La investigación al respecto ha aumentado con una gran subida en la primera década del siglo XXI, como muestra la gráfica (Fig. 3.2) presentada en (Peddie 2019). Es de esperar que este campo continúe su desarrollo en los próximos años.

Principios y conceptos del ray-tracing.

El *ray-tracing* está íntimamente relacionado con la Óptica Geométrica. Los principios de los que parte son los mismos. Un rayo surge de una fuente de luz y llega a un objeto del espacio. En ese punto el rayo se refracta y se refleja. Por tanto, una primera línea de pensamiento para simular computacionalmente el comportamiento de la luz implicaría simular todos los procesos ópticos tal y como se describen en la Óptica Geométrica.

El *ray-tracing* surgió como un método de simulación de este comportamiento mediante métodos informáticos. Sin embargo, las fuentes de luz emiten muchos rayos que no llegan a golpear ningún objeto dentro de la imagen generada en el ordenador y mucho menos llegan a nuestro punto de vista. De hacer el cálculo de todos estos rayos gastaríamos demasiada potencia de computación. Es por ello que en el caso del *ray-tracing* se toma el camino opuesto del rayo.

Figura 3.1. El *ray-casting* es una técnica para analizar la posición de las distintas superficies respecto a la cámara. Para ello, se emite un rayo desde la cámara y se analiza la distancia de los puntos de intersección de las superficies a la cámara (Elaboración propia, 2022)

Figura 3.2. Gráfico en el que se muestran el número de artículos publicados sobre el *ray-tracing* por año. El último año se produce un descenso por ser el año de estudio y no encontrarse completo (Peddie, J. (2019) *Ray Tracing: A Tool for All*. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-17490-3, p. 23)

De esta forma, se divide el plano del cuadro en sectores que se corresponden con los píxeles que forman la imagen (Fig. 3.3). Desde el punto de vista se proyectan rayos que atraviesan cada uno de los píxeles de la imagen hasta que se intersecan con el primer objeto de la escena. En realidad el algoritmo calcula todas las intersecciones y toma la más cercana al plano del cuadro. Posteriormente, desde dicho punto de intersección se calculan los diversos rebotes de dicho rayo, teniendo en cuenta tanto el rayo reflejado como el refractado, etc. Tras varias reflexiones de dicho rayo con los diferentes objetos de la escena se calcula el valor correspondiente a cada píxel de la escena.

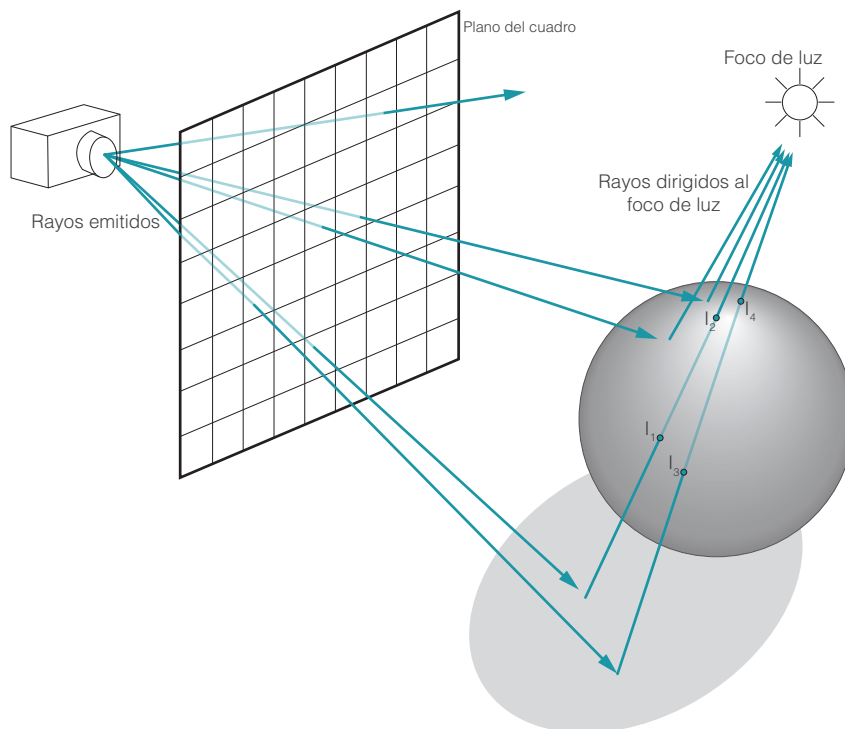
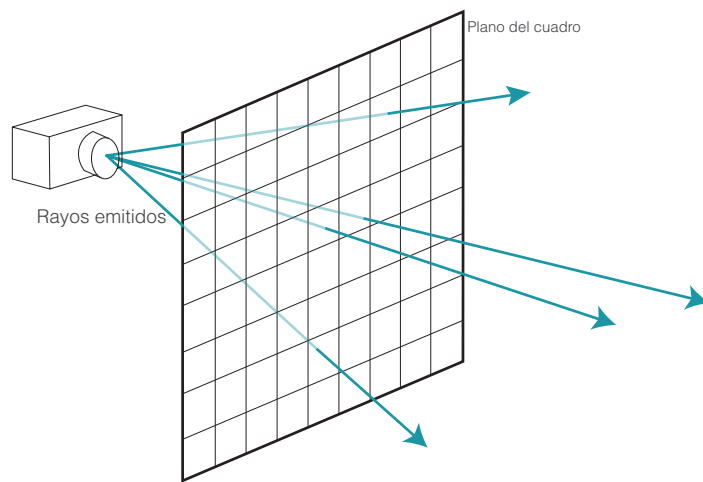
Como se ha comentado previamente, para emplear la técnica del *ray-tracing* es fundamental acudir a la técnica del *ray-casting*, lo que nos va a permitir determinar la posición relativa de las superficies de la escena y por tanto determinar la o las intersecciones del rayo analizado con cada plano, en el que se habrá definido un comportamiento respecto a la luz atendiendo al material (esto se comentará en la sección *El comportamiento de los materiales. La función BRDF.* en la página 202). Desde cada punto de intersección se lanza un rayo hacia los focos de luz (Fig. 3.4). Si ese rayo interseca con un material sólido el punto de donde parte estará en sombra pero en caso contrario estará iluminado (Haines y Akenine-Möller 2019). Este proceso de *ray-casting* se aplica de forma recursiva en la escena hasta que se produce un número predeterminado de rebotes del rayo analizado.

Métodos del ray-tracing.

En la gran mayoría de casos, para obtener resultados óptimos es necesario recurrir a técnicas estocásticas de Monte Carlo. Utilizar un método determinista implica que el resultado de

Figura 3.3. En el renderizado mediante el *ray-tracing* se divide el plano del cuadro en píxeles y se emiten rayos por cada uno de ellos para calcular el valor del mismo (Elaboración propia, 2022)

Figura 3.4. Una vez los rayos emitidos se intersecan con alguna superficie se dirige un rayo hacia el/los foco/s de luz para calcular el valor de dicho punto. Se pueden realizar varios rebotes para mayor precisión (Elaboración propia, 2022)

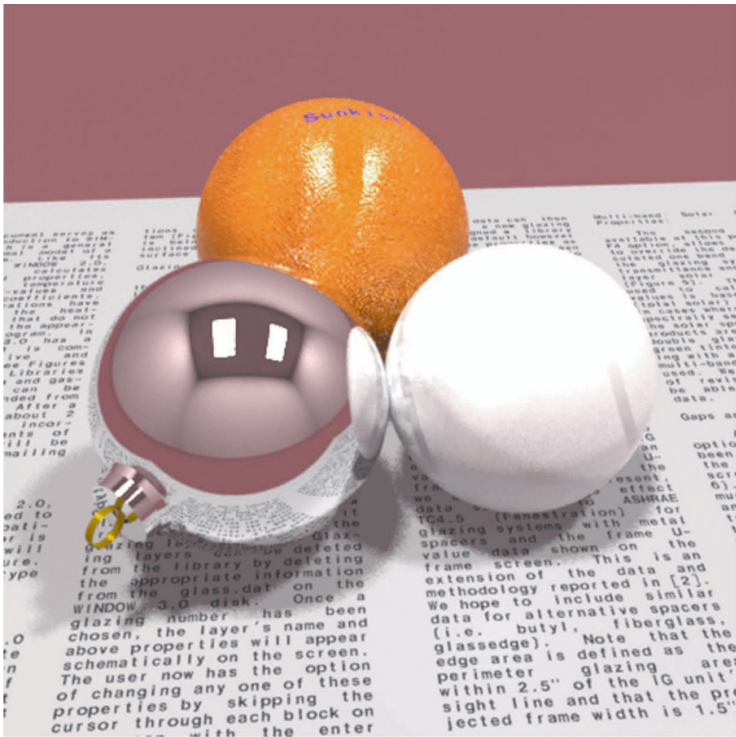
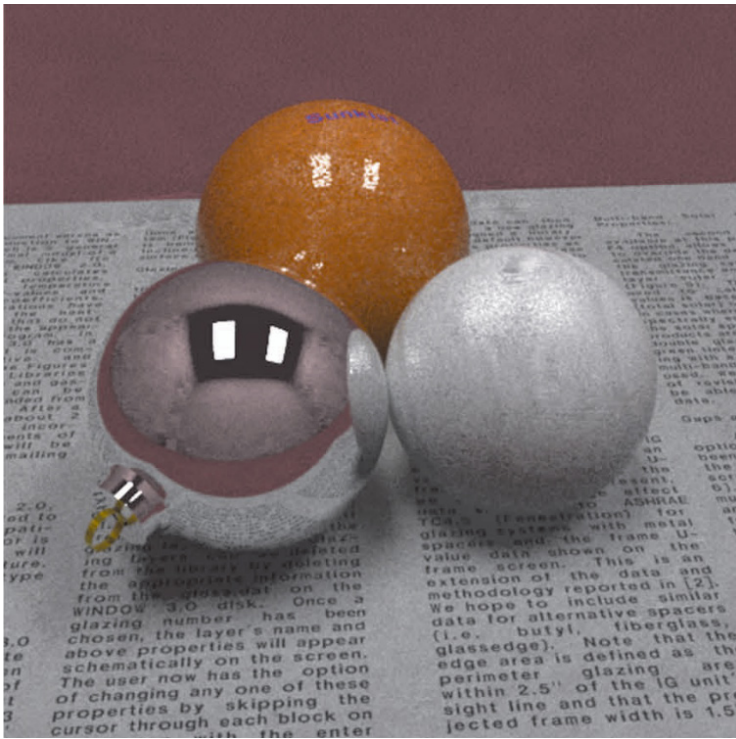
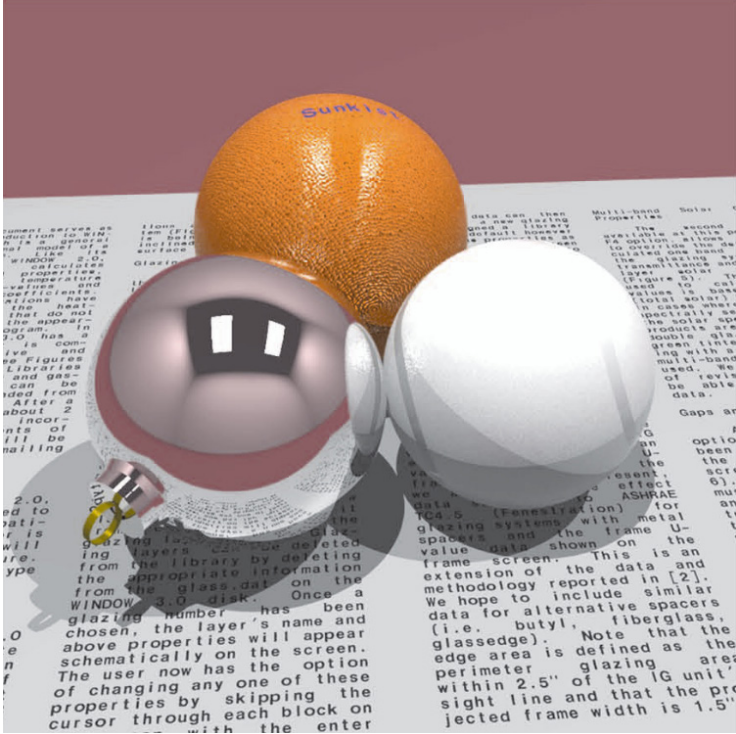


una imagen renderizada será igual independientemente del número de veces que se repita, mientras que un método estocástico generará imágenes con ligeras diferencias. A pesar de que pueda parecer desconcertante, los fotones que conforman la luz actúan en cierta medida de manera aleatoria debido a distintos factores como los fenómenos atmosféricos, etc. La sensación de uniformidad y estabilidad se produce debido al alto número de ellos que conforma un rayo de luz (Ward Larson y Shakespeare 2021). Un ejemplo en el que podemos ver esto es analizando la sombra arrojada de un objeto (Fig. 3.5). Con un método determinista generará una sombra definida, delimitando claramente la parte iluminada y la zona en sombra. Sin embargo, con un método estocástico, esa frontera no será tan clara, sino que se generará una zona en penumbra. Este comportamiento de las sombras se asemeja más a la percepción física de las sombras y por tanto la imagen generada por estos métodos de Monte Carlo será más realista.

Si utilizamos un método estocástico para generar una imagen, cuando uno de los rayos emitidos alcance un objeto, este rayo se reflejará en una dirección pseudoaleatoria, para cuyo cálculo también dependerán las características del material del objeto. Cuantos más rayos se emitan en la escena, más preciso será el resultado. Sin embargo, estas técnicas generan ruido en la imagen. Este ruido es el que difiere entre una imagen y otra generadas con los mismos parámetros y la misma escena.

Por tanto, un método determinista generará una imagen más limpia pero menos realista que un método estocástico. Además, este segundo método necesita de mucho más tiempo de renderizado para minimizar el ruido que se pueda producir. Esto implica que ninguno de los dos métodos es completamente satisfactorio. Es por ello que la mayoría de motores de renderizado utilizan una mezcla

Figura 3.5. (Arriba) Modelo renderizado con un método determinista (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 21*), (Medio) Modelo renderizado con un método estocástico (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 22*) y (Abajo) Modelo renderizado con un método híbrido (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 24*)



de ambos métodos, generando un método híbrido que produce resultados bastante precisos.

El comportamiento de los materiales. La función BRDF.

La técnica del *ray-tracing* define el comportamiento de la luz en general, pero tan importante como ello es la correcta definición de las características de los materiales que definen la escena. Estas características van a determinar cómo y con qué intensidad se va a reflejar, refractar o absorber un rayo que impacta contra un objeto. Es decir, cuando definimos el material definimos el comportamiento de la luz que incide sobre él. Todos sabemos que el aspecto del metal difiere al del vidrio o al de un tejido de coralina. Las características visuales de estos materiales se determinarán mediante la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional o BRDF por sus siglas en inglés. Esta función forma parte de una familia de funciones llamadas BxDF, donde se encuentran funciones como la BSDF (Función de Distribución de Dispersión (*Scattering*) Bidireccional) o la BTDF (Función de Distribución de Transmitancia Bidireccional). Todas estas funciones tratan de explicar el comportamiento de la luz en contacto con los distintos materiales y de esta forma poder parametrizar este comportamiento.

Estas funciones no tienen una única definición, es decir, no son una función concreta ya definida, sino que distintos investigadores han planteado diferentes definiciones atendiendo más a unos aspectos u otros de la materialidad. Es importante tener en cuenta que no todas estas BRDF van a buscar un realismo físico, sino una apariencia visual realista, o incluso en algunos casos buscan efectos no realistas. Aun así, algunas de ellas sí que utilizan modelos físicos para obtener dichos resultados. Atendiendo a esta

idea, Montes y Urueña (2012) realizan una primera clasificación de las BRDF, dividiéndolas en tres categorías:

- **Empíricas:** Son aquellas que simulan un tipo de reflexión concreto sin considerar la física que hay detrás.
- **Teóricas:** Son aquellas que simulan la dispersión lumínica de forma precisa atendiendo a las leyes de la física.
- **Experimentales:** Son aquellas obtenidas mediante mediciones con goniorelectómetros, aparatos diseñados específicamente para este fin.

En el *review* realizado por estos autores (Montes y Ureña 2012) se analizan varios de los modelos BRDF atendiendo a los siguientes parámetros:

- **Físicamente plausible:** Es decir, si la BRDF obedece a las leyes de la conservación de la energía, así como a la reciprocidad y la no negatividad.
- **Expresividad:** La facilidad de ajuste de los parámetros de la función.
- **Usabilidad:** La posibilidad de representar diferentes materiales.
- **Realismo:** Cómo se ajusta la BRDF al comportamiento real de los materiales representados.
- **Eficiencia:** La eficiente implementación de la función en los algoritmos de cálculo de la iluminación de la escena.
- **Precisión:** Cómo se representan los componentes de difusión, especularidad... y el grado de simplificaciones.
- **Isotropía:** Algunas BRDF se centran en los materiales isotropos, es decir, cuyas características son independientes de la dirección en este caso de la luz, sin embargo otras se centran en definir el comportamiento de materiales anisotropos.

Atendiendo a estos parámetros encontraremos funciones BRDF más específicas para unos u otros objetivos. En la Fig. 3.6, extraída de (Montes y Ureña 2012), encontramos un árbol con algunos modelos BRDF agrupados por categorías y diferenciados por isotropía.

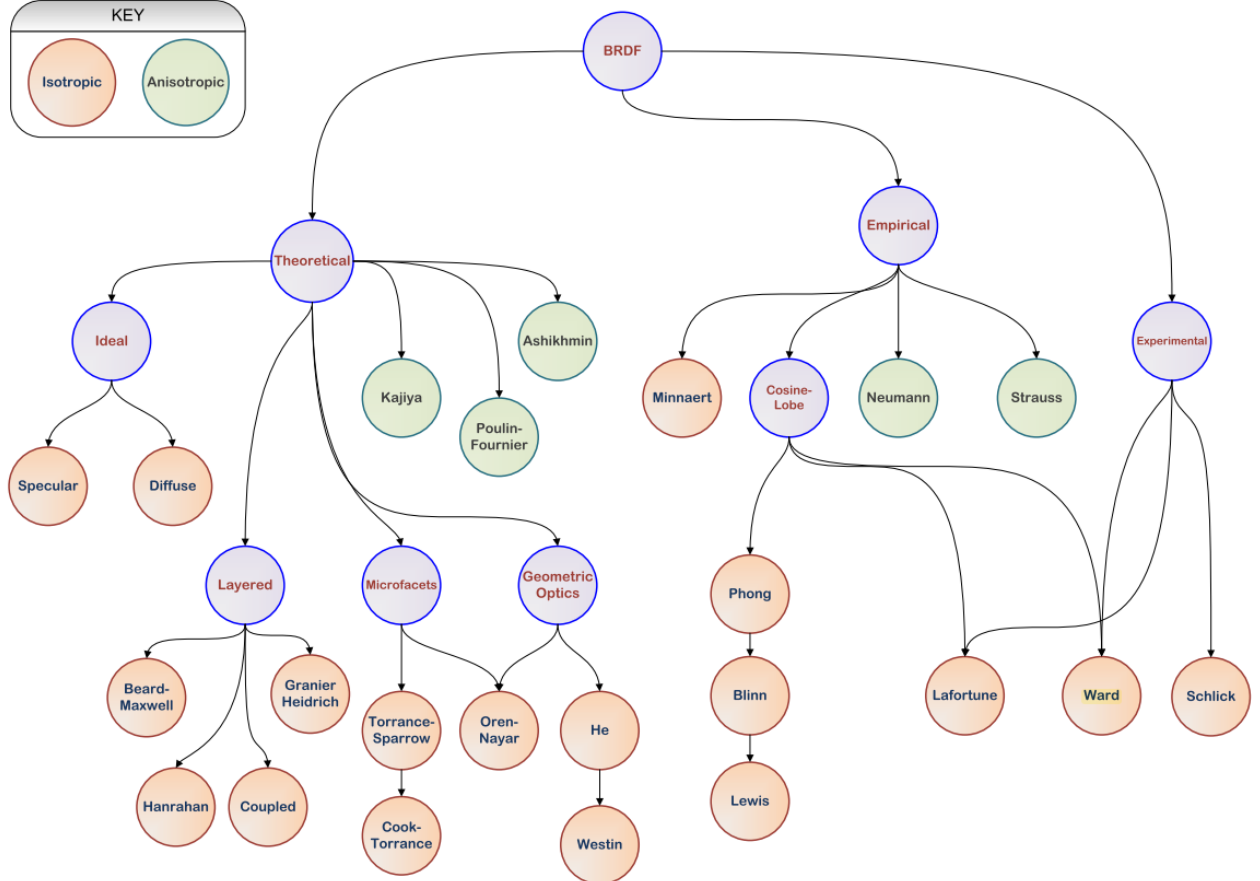
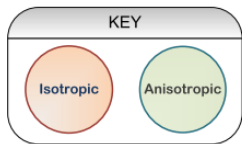
Los mapas de fotones.

A pesar de lo visto anteriormente, el *ray-tracing* genera ciertos problemas a la hora de trabajar con ciertos aspectos del mundo real como pueden ser las interreflexiones difusas entre elementos, la dispersión subsuperficial y el trabajo con cáusticas. Por ese motivo, se desarrolló entre 1995 y 2001 un algoritmo de mapeado de fotones o *photon mapping*, que resolvía estos problemas.

El trabajo de renderizado con el mapeado de fotones consta de dos fases. Primeramente, se calcula el mapa de fotones, generado a través de un número finito de fotones que son emitidos desde la fuente de luz a la escena. Seguidamente, se produce el renderizado de la escena a través del *ray-tracing* y se combina con el mapa de fotones generado previamente para obtener un valor de radiancia más preciso. Esto da mayor realismo a la escena.

En esta investigación se realizaron ciertas pruebas con la herramienta de mapeado de fotones. Sin embargo, al analizar los resultados se comprobó que la herramienta no funcionaba correctamente y por tanto se desestimó la idea de utilizarlo. Esta cuestión se desarrolla con más detalle en el apartado *Limitaciones* en la página 290.

Figura 3.6. Mapa conceptual de distintos modelos BRDF (Montes, R. y Ureña, C. (2012) «An Overview of BRDF Models», Technical Report, University of Granada, pp. 1-26, p. 6)



3.1.2. Programas de simulación fotométrica.

En el mercado existen muchos programas de renderizado con los que se obtienen imágenes fotorrealistas que asemejan a imágenes reales que podríamos haber tomado con una cámara fotográfica. Sin embargo, aunque dichas imágenes sean excepcionales desde una perspectiva visual, no podemos asegurar que sean fotométricamente precisas. A pesar de que los términos fotorrealista y fotométricamente preciso puedan parecer sinónimos, presentan unos ligeros matices diferenciadores. Las imágenes fotorrealistas buscan parecer o asemejarse a la realidad, logrando resultados muy buenos en algunos casos. Sin embargo, para conseguir dichos resultados pueden apoyarse en artificios que no presentan una base física real. Por tanto, en dichos casos, los resultados no pueden tomarse como válidos desde un punto de vista físico. Una imagen o simulación fotométricamente precisa sí que ha sido creada a partir de una base física real y por tanto las mediciones obtenidas a partir de dicha simulación son válidas.

Para poder asegurar que dicha visualización de la luz cumple con unos requisitos suficientes para considerarlo precisos hay que resolver al menos dos problemas básicos. Por un lado se encuentra el problema de la iluminación global, que se debe resolver correctamente, definiendo las formas en las que la luz rebota sobre las superficies del modelo tridimensional. Por otro lado, y en el mismo orden de importancia, hay que asegurarse que el programa resuelve con precisión el modelo de iluminación local, es decir, cómo la luz se emite, refleja y transmite por cada superficie.

En otro orden y como se comenta en el capítulo 3.1.1. *Modelos de simulación de la luz*. en la página 193, aparte de una correcta simulación de la luz, es importante definir un modelo de distribución

bidireccional de reflectancia-transmitancia (BRDTF) que defina correctamente el comportamiento de los materiales cuando la luz incide sobre ellos.

Hay varios programas de simulación de la luz. Sin embargo, uno de los más utilizados en el ámbito científico y sobre el que se basan muchos otros programas es Radiance. Es por ello el programa con el que se ha trabajado en la investigación que aquí se presenta.

Radiance

Radiance es un conjunto de herramientas que están diseñadas para llevar a cabo una simulación precisa desde una perspectiva fotométrica. Consta de más de 50 herramientas que permiten el desarrollo de dicha simulación en todas sus fases, desde el modelado, definición de parámetros, renderizado, procesamiento de imagen, cálculo y visualización.

Este conjunto de herramientas cumple con cálculos precisos de luminancia y radiancia. Simula tanto luz natural como luz eléctrica, si bien esta última no es objeto de estudio en el presente trabajo, y admite una gran variedad de modelos de reflectancia, es decir, incluye distintos tipos de materiales cuyos parámetros pueden variar, así como un tipo de material que consiste en una BRDTF que se puede modificar. Todos estos materiales están basados en resultados de estudios sobre la interacción física de la luz en distintas superficies (Ward Larson y Shakespeare 2021).

Para este estudio se optó por utilizar *Radiance* por ser este el programa que más se adaptaba a nuestras necesidades, así como ser uno de los programas más utilizados en el campo de las simulaciones de luz a nivel científico y técnico.

3.1.3. Requisitos físicos.

A la hora de plantear la investigación primero se determinó qué era aquello que necesitábamos medir. La hipótesis de partida consistía en que la geometría de los edificios condicionaba la concentración de rayos lumínicos o *rayos de la muerte* por el fenómeno de reflexión de la luz solar en la fachada de los edificios. Por tanto, el primer requisito era el de poder llevar a cabo una simulación de una volumetría compleja y con unos materiales que tuvieran un comportamiento muy similar a los de la realidad.

Como hemos comentado, *Radiance* permite la definición de gran variedad de materiales con un comportamiento físicamente realista. En cuanto a la volumetría, aunque se puede generar directamente con *Radiance*, resulta más sencillo generarla en un programa de modelado tridimensional de los que se ofrecen en el mercado. *Radiance* ofrece herramientas para convertir estos modelos a un archivo con el que se pueda trabajar para simulación de luz. Por ello, se recurrió al modelado en un programa externo para obtener un archivo .obj que es compatible con *Radiance*, pudiéndolo utilizar mediante la herramienta *obj2rad* incluida en el programa.

En cuanto a las magnitudes que necesitábamos estudiar, debían ser aquellas que nos permitieran determinar la existencia o no del fenómeno de *rayo de la muerte*. Es decir, teníamos que ser capaces de analizar los valores de energía lumínica de las superficies sobre las que incidían los rayos reflejados. Dichas magnitudes, por

tanto, debían ser la irradiancia y la iluminancia, definidas como la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética o de el espectro luminoso respectivamente. Es decir, con estos dos valores podemos determinar por un lado puntos de concentración energética de todo el espectro electromagnético causantes de los problemas de aumento de temperatura, y por otro lado la concentración lumínica causante de los problemas de deslumbramientos.

En realidad, aunque hay que ser consciente de qué magnitud estamos trabajando y qué implica, ambos valores tienen la misma causa y por tanto podemos trabajar con uno solo de ellos y poder extrapolar los resultados a la otra magnitud. La única diferencia se podría apreciar en el caso de que el material sobre el que incidan los rayos solares absorba gran cantidad de energía dentro del espectro lumínico y refleje el resto del espectro electromagnético o viceversa. Sin embargo, para las simulaciones se ha evitado el uso de dichos materiales ya que la hipótesis no se centra en el rango del espectro electromagnético utilizado sino en la geometría del edificio. *Radiance* permite el estudio tanto de irradiancia como de iluminancia.

Sin embargo, y aunque *Radiance* es un software utilizado en diversos estudios que presentan similitudes con el trabajo aquí presentado, resultó conveniente realizar una validación de la herramienta que se presenta en el siguiente capítulo 3.2. *Validación*. en la página 213.

3.1.4. Requisitos de usuario

Una vez determinados los requisitos físicos que necesitábamos tener en cuenta en las simulaciones, había que tener en cuenta otros factores que también resultarían determinantes en la investigación. Por un lado se encontraba la curva de aprendizaje del propio *software* y por otro lado los problemas de tiempo y memoria de computación necesarios para llevar a cabo la investigación.

Curva de aprendizaje.

Como hemos comentado, la *suite Radiance* resulta una herramienta muy útil respecto a la simulación del comportamiento de la luz. Dispone de diversas herramientas que permiten controlar importantes aspectos tanto de la luz como de los materiales y el entorno. Sin embargo, no dispone de una interfaz para trabajar y dispone de gran cantidad de herramientas a las que se debe acceder mediante comandos. No hay mucha documentación oficial sobre el *software*, que se concentra en la web <https://www.radiance-online.org/> y en el libro *Rendering with Radiance* (Ward Larson y Shakespeare 2021). Por ello, la iniciación con *Radiance* no es sencilla y la curva de aprendizaje resulta algo empinada al principio. Sin embargo, alrededor de este *software* existe una comunidad activa que se concentra en el foro <https://discourse.radiance-online.org/> y donde el Greg Ward, creador de *Radiance*, y otros colaboradores responden personalmente las dudas de la comunidad.

Valoración de tiempos. Uso de un servicio de computación de alto rendimiento.

Otro factor importante que debimos tener en cuenta fue el tiempo de computación necesario para llevar a cabo las simulaciones. Estas simulaciones funcionan mediante la generación de una imagen renderizada de la que se extrae información *a posteriori*. Dependiendo de la resolución y los parámetros que se establecieran en la renderización de la imagen el tiempo de cálculo aumentaba. Además, los cálculos posteriores también consumían mayor tiempo.

Las características de la máquina donde se lleven a cabo las simulaciones también son determinantes. Al principio se realizaron varias series de simulaciones en ordenadores personales de sobremesa con diferentes prestaciones. Sin embargo, estas series tardaban excesivo tiempo y hacían poco viable el estudio. Además, estos ordenadores no permitían un gran volumen de trabajos simultáneos por problemas de memoria. Por esta razón se optó por solicitar el acceso al servicio de computación de alto rendimiento (supercomputación) de la Universidad Politécnica de Madrid, el sistema denominado Magerit-3. Este servicio permite la ejecución de simulaciones y otro tipo de trabajos informáticos que requieren una gran capacidad de cómputo mediante trabajos por lotes. El acceso a este servicio conllevó una importante mejora en cuanto a tiempos y volumen de trabajos.

Valoración de tiempos. Trabajo con GPU.

Al trabajar con desde la GPU es posible reducir considerablemente el tiempo de computación, realizando simulaciones mucho más eficientemente. Al contrario de la CPU, las GPU están diseñadas para procesar varias tareas al mismo tiempo. Constan de muchos núcleos que están más especializados que los de la CPU. Por tanto, estos núcleos ofrecen un rendimiento masivo si la tarea de procesamiento, en nuestro caso la simulación de la luz, se puede dividir en tareas que pueden realizarse en paralelo.

Para hacer que esto sea posible es necesario crear un programa específico para ello, ya que Radiance no está desarrollado para la aceleración por GPU. Aun así, hay una suite basada en Radiance llamada Accelerad en la que su creador ha adaptado los programas de Radiance para la aceleración por GPU. Cuenta con el mismo motor de *ray-tracing* que utiliza Radiance y los resultados son presentan la misma calidad que los obtenidos con él. Sin embargo, no se encuentran implementadas todas las funcionalidades de Radiance.

inalmente se optó por utilizar Radiance al estar más extendido y tener mayor soporte. Además, Accelerad precisa de unos requisitos del sistema más estrictos, como la disposición de una GPU con CUDA de 5.0 a 7.5, lo que impide que pueda desarrollarse estos estudios en cualquier sistema.

Es importante recalcar que esta decisión de no utilizar la aceleración de cálculo por GPU se basa en el hecho de que el objetivo de este trabajo no es metodológico y por tanto no se ha buscado la optimización del método. En posteriores estudios derivados de esta investigación podría desarrollarse un programa que optimice los tiempos de procesado y simulación.

3.2. Validación.

Una vez elegida la herramienta para desarrollar las simulaciones se hizo necesario analizar su correcto funcionamiento para así validar su uso. Estas validaciones se realizaron con un modelo que generase una cáustica conocida como es el caso del cilindro.

Se comenzó con una validación de la continuidad física del modelo con el objetivo de analizar un comportamiento correcto a nivel físico de la herramienta. Posteriormente, se analizaron otros parámetros como la resolución de la imagen, de la geometría y la reflectancia de los materiales, de forma que nos permitiera conocer el efecto de la variación de estos parámetros en las simulaciones.

Finalmente se desarrolló un estudio de un caso ya publicado para poder comparar nuestra metodología y resultados con los obtenidos por otros investigadores.

3.2.1. Modelo y parámetros generales.

Para todas estas comprobaciones hemos utilizado el mismo modelo (con posibles variaciones que se argumentarán en el apartado correspondiente) y las mismas condiciones de luz, de ambiente y de materiales (a no ser que se especifique lo contrario en el apartado correspondiente).

Como edificio de estudio elegimos uno cuyas medidas se corresponden con un edificio de unas 15 plantas aproximadamente. La forma de la fachada sur es circular cóncava, de forma que podemos apreciar concentraciones debidas a la reflexión.

Este edificio se encuentra situado a una latitud de 45°N debido a que es alrededor de esta latitud donde se encuentran la mayor parte de edificaciones en las que se han reportado casos de *rayos de la muerte*.

En cuanto a las condiciones de luz, esta se genera a través del programa *gensky* de Radiance indicando la fecha y posición del edificio y con la opción de generar un cielo soleado con sol, es decir, creando una fuente de luz que simula el sol y una función de distribución correspondiente al estándar CIE de un día claro (CIE-Comission Internationale de l'Eclairage 2003). Este último parámetro se escoge así por ser el que causará valores más altos de iluminancia. Este ejemplo que se muestra es para el 30 de diciembre a las 12:00 CET:

```
# gensky 12 30 12:00CET -y 2010 +s -a 45 -o -15
# Local solar time: 11.96
# Solar altitude and azimuth: 21.8 -0.6
# Ground ambient level: 11.0

void light solar
0
0
3 5.42e+06 5.42e+06 5.42e+06

solar source sun
0
0
4 0.009858 -0.928166 0.372037 0.5

void brightfunc skyfunc
2 skybr skybright.cal
0
7 1 4.95e+00 9.90e+00 3.44e-01 0.009858 -0.928166
0.372037
```

Por otro lado, se utiliza un archivo de definición de ambiente en el que se definen un cielo y un suelo. La función *gensky* genera

una descripción del sol y la función de distribución del cielo. Sin embargo, no quedan definidos el cielo y el suelo reales, por lo que tendremos que generar un archivo en los que se describa el fondo de la escena. Estos elementos de cielo y tierra generados estarán condicionados por la función de distribución del cielo (*skyfunc*). Estos parámetros no se han modificado en ninguna de las pruebas de validación:

```
# A standard sky and ground to follow
# a gensky sun and sky distribution.

skyfunc glow sky_glow
0
0
4 .9 .9 1.15 0

sky_glow source sky
0
0
4 0 0 1 180

skyfunc glow ground_glow
0
0
4 1.4 .9 .6 0

ground_glow source ground
0
0
4 0 0 -1 180
```

Los materiales elegidos se corresponden con los siguientes parámetros numéricos:

```
void plastic Suelo
0
0
5 .25 .25 .25 .1 .05
```

```
void plastic Tono
```

```
0
```

```
0
```

```
5 .35 .42 .5 0 0
```

```
void mirror Edificio
```

```
1 Tono
```

```
0
```

```
3 .27 .27 .27
```

Para la envolvente del edificio optamos por un material de tono azul grisáceo, similar al de algunos vidrios, y una reflectancia del 27%, similar a la de varios vidrios del mercado, aunque esta ha sido variada en los distintos experimentos. En el caso del suelo, optamos por un material gris con una reflectancia del 10% y una rugosidad del 5%.

Finalmente, y debido a la importancia que esto tiene en el modo de funcionamiento del programa, la elección del punto de vista es determinante. Radiance ejecuta un renderizado de la geometría con los parámetros asignados y calcula los valores de iluminancia a partir de la imagen obtenida. En nuestro caso optamos por una vista picada desde el suroeste al edificio de forma que se pudiera enmarcar la totalidad del edificio y la zona donde suponíamos que se producirían la mayor parte de los reflejos, sobre todo en las horas centrales del día. La proporción de la vista escogida es cuadrada. La vista se corresponde con la siguiente definición:

```
rvu -vtv -vp -40000 -100000 100000 -vd 17.669 27.6274  
-29.7615 -vu 0 0 1 -vh 45 -vv 45 -vo 0 -va 0 -vs 0 -vl 0
```

3.2.2. Análisis de la continuidad física.

Una de las primeras comprobaciones era asegurarnos de la continuidad de los valores físicos. La óptica que estamos empleando en esta investigación y las condiciones de estudio deberían ser en general continuas, pudiendo producirse discontinuidades debidas a discontinuidades en el modelo o a un insuficiente refinamiento espacial o temporal. Por tanto, una de las primeras comprobaciones fue asegurarnos de que esa continuidad se cumplía y en caso de producirse alguna discontinuidad analizar la causa.

Para ello, se tomaron cinco puntos de análisis y se calculó la iluminancia a lo largo de todo un año a la misma hora en dichos puntos de forma que, como hemos comentado, se debía obtener una gráfica de iluminancia a lo largo del año que refleje bastante continuidad y, en los casos en los que se vieran discontinuidades, se pudiera analizar por qué se producen estas discontinuidades. Los puntos elegidos fueron un punto en la superficie del edificio, p_1 , correspondiente con las coordenadas 1440px, 3000px en una imagen de 4096px por 4096px; un punto en el suelo dentro del radio de alcance del edificio y en ciertos momentos del año coincidente con la cáustica, p_2 (1440px, 1820px); otro que se sitúa frente al edificio y gran parte del año fuera del alcance del mismo, p_3 (3000px, 1440px); uno que no se ve afectado por el edificio, p_4 (3000px, 3000px) y finalmente un punto dentro del radio de afección del edificio pero fuera de la cáustica, p_5 (1250px, 1650px).

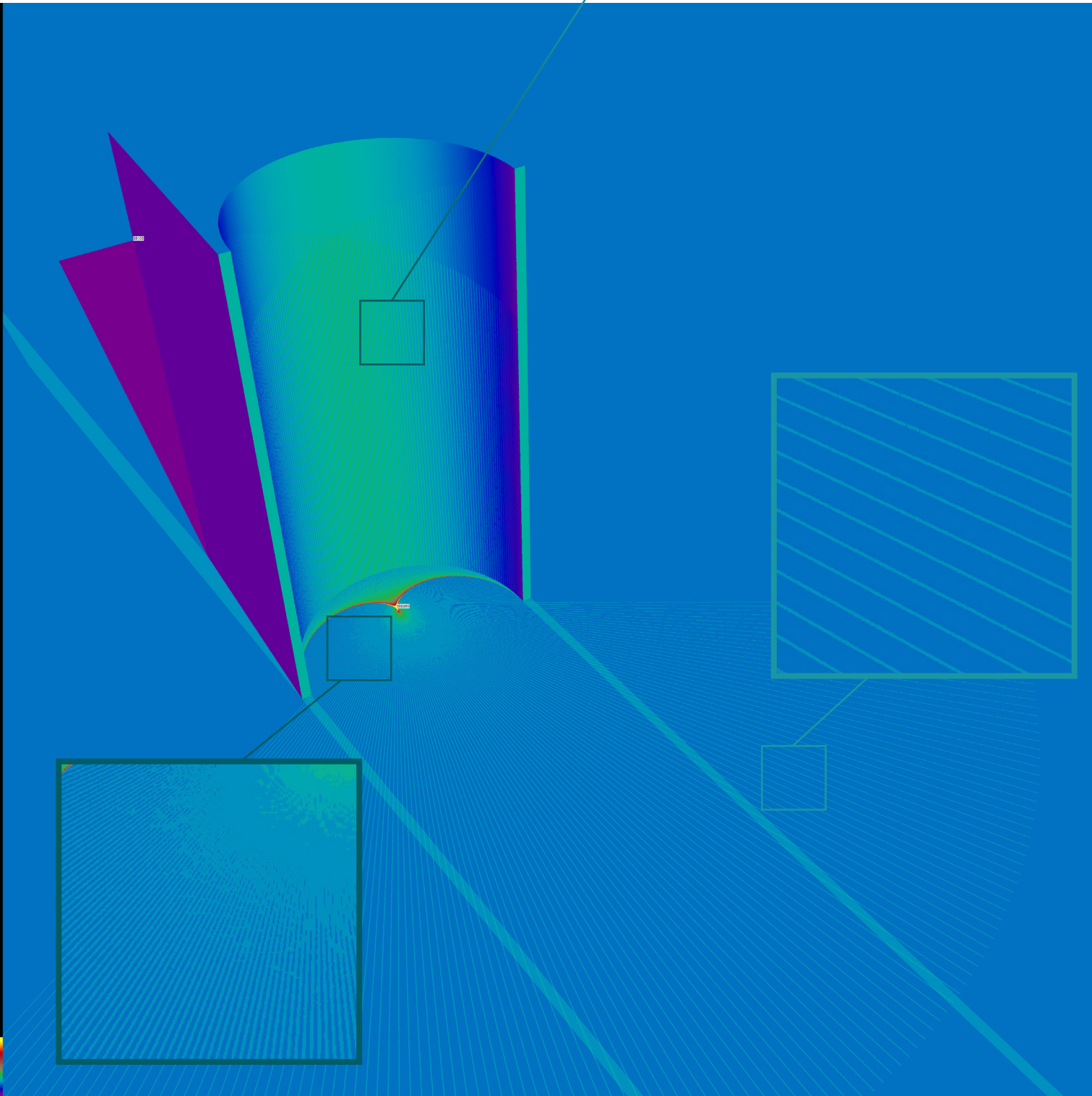
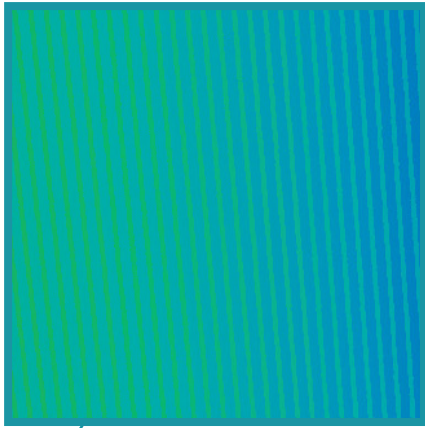
Si vemos la gráfica de iluminancia que se mide en el punto p_1 a lo largo de un año (Fig. 3.8), se aprecia una cierta continuidad que se ve interrumpida por varios saltos en días puntuales. Analizando

estos saltos en las imágenes, hemos podido concluir que se producen por la discretización espacial de la superficie, que está formada por polígonos, y por tanto la reflexión de las caras se va a producir de forma poligonal, como se puede apreciar en la Fig. 3.7. Esta circunstancia la vamos a encontrar en las gráficas de los otros puntos estudiados, sin embargo no supone un problema importante porque conocemos cuál es el factor que lo genera.

En cuanto al punto p_2 , la gráfica de la Fig. 3.8 muestra dos momentos a lo largo del año en los que se generan valores altos de iluminancia, mientras que el resto de valores presentan cierta continuidad. Si analizamos la posición del punto en el espacio vemos que se sitúa muy próximo al punto de concentración de rayos producido por el edificio. Durante dos periodos del año esa concentración de rayos se sitúa sobre el punto estudiado, mientras que el resto del año, aunque próximo, el punto no se encuentra sobre dicha concentración. Es por esto que vemos que la gráfica tiene una forma relativamente continua en los valores bajos, donde también se aprecian saltos similares a los del punto p_5 aunque difícilmente apreciables en la gráfica debido a la escala. Lo que sí es fácilmente apreciable son los grandes saltos que se encuentran en las zonas donde el punto p_2 se sitúa sobre el área de la cáustica. En esa zona los saltos son bastante amplios aunque se puede apreciar cierta continuidad. En la próxima validación de la resolución de imagen podremos apreciar como dicho factor afecta a la continuidad de esta zona.

Analizando la gráfica el punto p_3 en la Fig. 3.8, se aprecia una gran continuidad, solo interrumpida en unos pocos días al año. Estas interrupciones se producen principalmente durante el invierno,

Figura 3.7. Detalle de las zonas en las que se sitúan los puntos p_1 , p_3 y p_5 donde se aprecia la discretización de la iluminancia debida a la discretización de la geometría. Esta imagen se corresponde con el 21 de octubre a las 12:00 (Elaboración propia, 2022)



21/10-12-0-Lux
200000
175000
150000
125000
100000
75000
50000
25000
0

cuando la inclinación del sol es menor y por tanto el radio de alcance de la reflexión del edificio es mayor, afectando al punto de estudio. Al igual que ocurría en el punto p_1 , el hecho de que la geometría esté discretizada produce que el reflejo no sea continuo, generando franjas con mayor iluminancia y otras con menor. Las discontinuidades en la gráfica del punto p_3 se producen justo en los días en los que el punto se sitúa sobre una de estas franjas con mayor iluminancia. La menor frecuencia de este fenómeno con respecto al punto p_1 se debe a que en la posición del punto p_3 las franjas de mayor iluminancia se encuentran más distanciadas, como se aprecia en la Fig. 3.7. Un efecto similar lo tenemos en el punto p_5 con una mayor prevalencia de saltos por encontrarse una mayor densidad de dichas franjas (Fig. 3.7). En este caso, la curva inferior se corresponde con las de los puntos p_3 y p_4 y es en la curva superior en la que se aprecia el efecto del edificio. Es decir, la curva superior es la que nos da los valores reales de la influencia del edificio en los valores de iluminancia del suelo.

Finalmente, el punto p_4 no se encuentra en la zona de influencia del edificio, por lo que la gráfica de la Fig. 3.8 es perfectamente continua. Esto es de gran interés para comprobar que la luz generada por Radiance cumple con las condiciones físicas esperables. El promedio de iluminancia a lo largo del año, alrededor de los 49.350 lux, se sitúa dentro de los valores orientativos mínimo y máximo de iluminancia de luz solar en un día medio, es decir, entre los 20.000 lux y los 100.000 lux (Elion y Elion 1979).

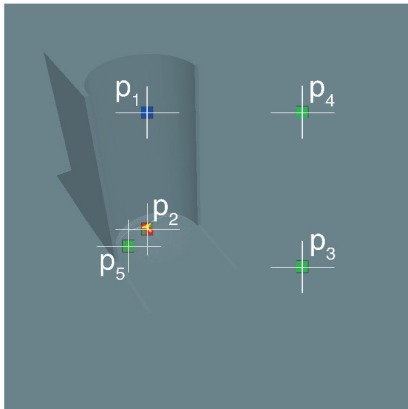
Tras este análisis, podemos concluir que los cálculos del programa respetan la continuidad física y reflejan las discontinuidades de manera correcta.

Figura 3.8. (Doble página siguiente) Resumen de los resultados del análisis de la continuidad física de las simulaciones (Elaboración propia, 2022)

Análisis continuidad física

Objetivo Comprobar la continuidad física de los valores obtenidos por el programa

Puntos estudiados

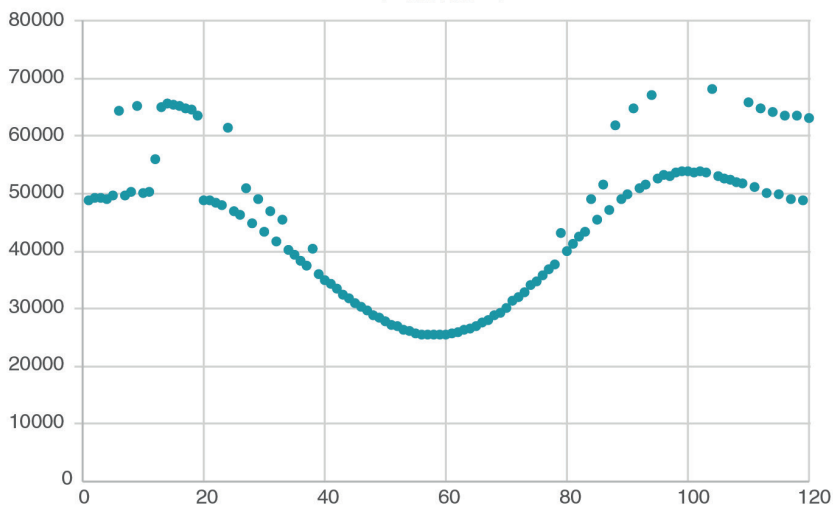


P₁ (1440px, 3000px)
P₂ (1440px, 1820px)
P₃ (3000px, 1440px)
P₄ (3000px, 3000px)
P₅ (1250px, 1650px)

Datos

Volumetría	Volumen completo
Reflectividad	17%
Resolución	4096px x 4096px
Variación temporal	Todo el año cada 3 días a las 12:00
Total de imágenes	120 imágenes

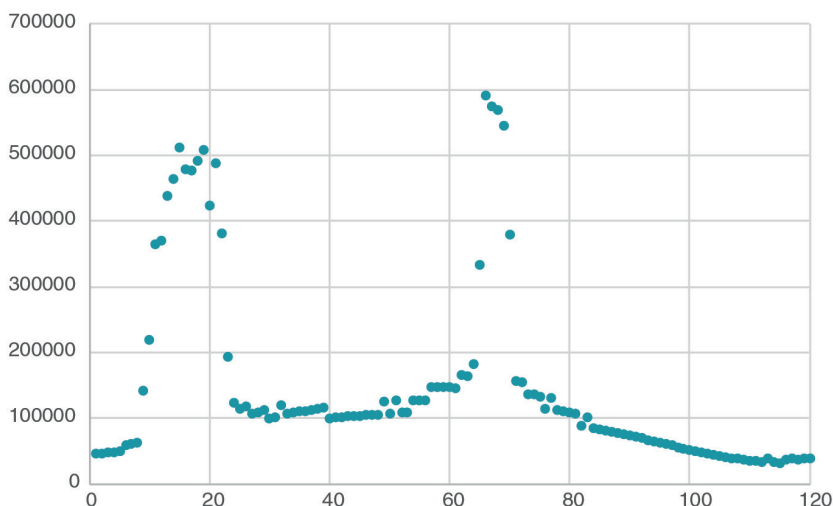
Punto 1



Punto 1

Este punto situado sobre la fachada del edificio y debido a la geometría de la misma, presenta valores de iluminancia menores en los meses centrales del año. La curva doble que aparece en la gráfica se debe a la discretización de la geometría.

Punto 2

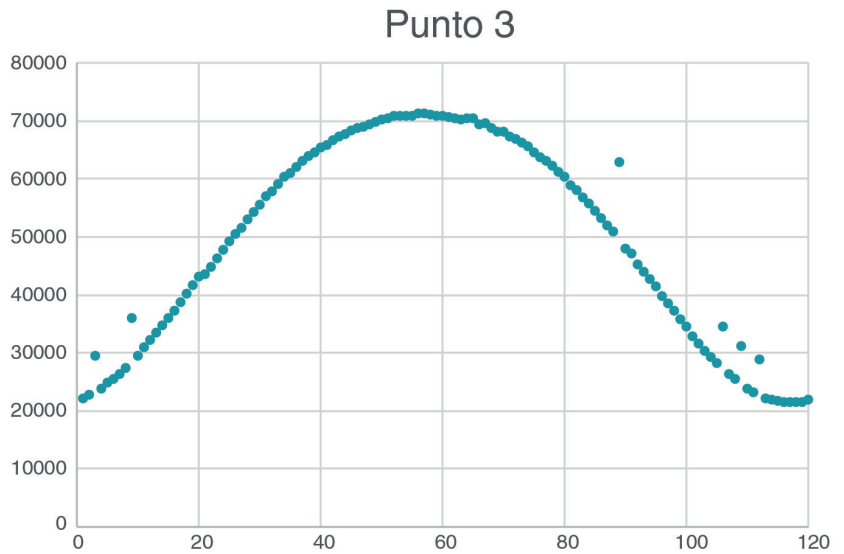


Punto 2

En el caso de este punto se producen dos momentos temporales de grandes picos correspondientes a las épocas en las que dicho punto se sitúa sobre la cáustica. Cuando ocurren estos saltos aparecen discontinuidades en la gráfica.

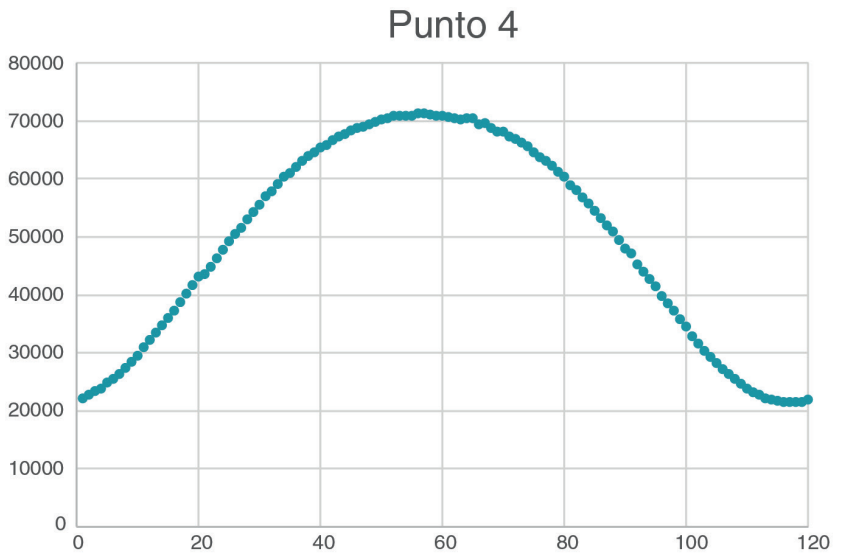
Punto 3

El punto 3 presenta una gran continuidad debido a que apenas se ve afectado por el edificio. Los puntos de discontinuidad que se aprecian en la gráfica se deben a las franjas de iluminancia por reflexión que aparecen por la discretización de la geometría.



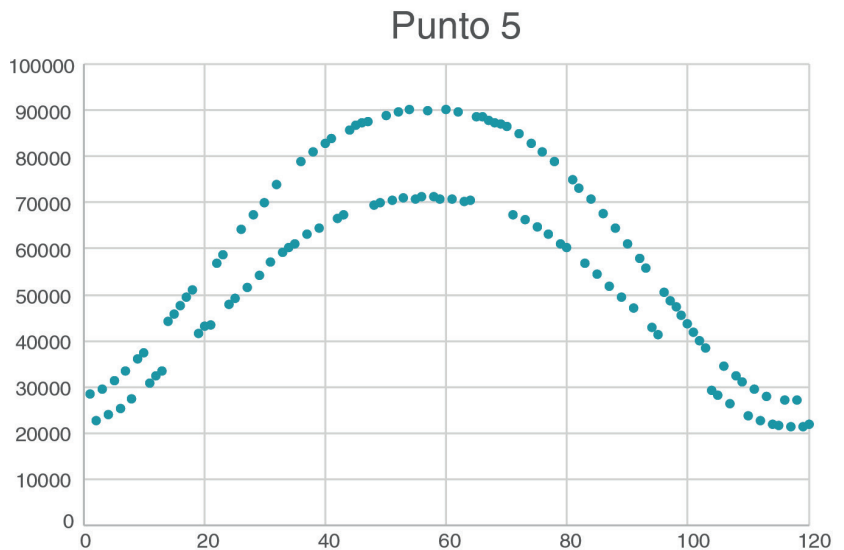
Punto 4

El punto 4 no se ve afectado por el edificio y por tanto presenta continuidad en todos sus puntos. Este punto nos sirve como punto de control para asegurar que el programa está funcionando de forma continua y esperable.



Punto 5

Finalmente el punto 5 también presenta dos curvas que se deben a la discretización de la geometría. La curva inferior toma los mismos valores del punto 4 mientras que la curva superior es la que presenta los valores de iluminancia debidos a la reflexión en la fachada.



3.2.3. Análisis de la resolución de imagen.

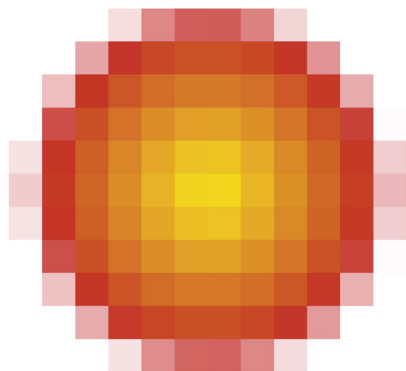
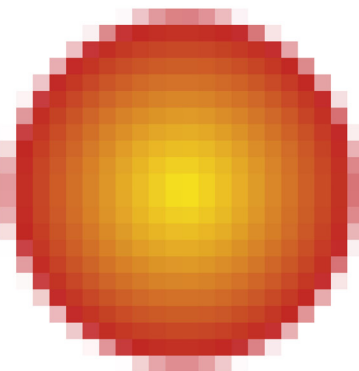
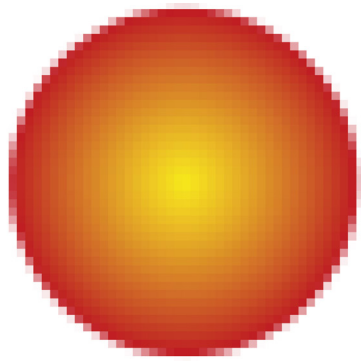
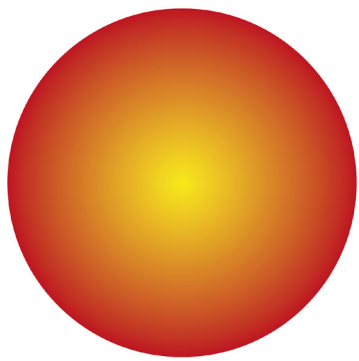
Radiance calcula los valores de radiancia (posteriormente convertible a iluminancia) y los almacena como información en cada uno de los píxeles de la imagen. En el caso de que un píxel abarque un área con un amplio rango de radiancias tomará como valor el de la radiancia media de dicho área. Por tanto, como es de suponer, a mayor resolución de la imagen, es decir, a mayor número de píxeles, más homogeneidad habrá en el área abarcada en cada píxel y por tanto, más precisión habrá en los resultados.

En edificios donde no hay grandes concentraciones, con bajas resoluciones se consiguen valores muy aproximados a los reales. Sin embargo, en edificios que producen mayores concentraciones en una zona pequeña nos encontramos que la curva de iluminancia presentaba grandes variaciones que no se correspondían con resultados físicamente correctos. Esto se debe al hecho de la homogeneidad en el área abarcada por un píxel (Fig.3.9).

Por ello se realizó un estudio de cómo variaban los valores de iluminancia a medida que aumentaba la resolución de la imagen, poniendo especial interés en la iluminancia máxima. Se analizaron los puntos p_1 , p_2 y p_5 que se muestran en la Fig. 3.10 y que son aquellos que se ven directamente afectados por el edificio. En las láminas resumen de esta investigación (Fig. 3.10) podemos analizar los resultados obtenidos.

Los puntos p_1 y p_5 no muestran variaciones en los resultados al variar la resolución de la imagen debido a que no se sitúan en zonas de grandes picos de iluminancia. Como se comentó en el análisis de la continuidad física, estos puntos presentan saltos debido a la naturaleza de la geometría.

Los casos más relevantes se presentan al analizar tanto el punto p_2 como los valores de iluminancia máxima. En estos casos, ambos



valores se centran en zonas muy concretas con grandes picos de iluminancia donde tenemos el problema de variaciones muy grandes de iluminancia en un área muy pequeña.

En ambos se ve una mejora en la continuidad de la gráfica a medida que se aumenta la resolución de la imagen. En el caso del punto p_2 , se observa también un descenso del valor máximo de iluminancia. Esto se debe a que al reducir la resolución, el área que se ve afectada por la concentración de rayos ocupa un número menor de píxeles y el valor medio de cada píxel se ve afectado. A medida que se aumenta la resolución, los valores de iluminancia se estabilizan y se vuelven más homogéneos.

Cuando analizamos el pico de iluminancia ocurre algo similar. En las resoluciones más bajas no se aprecia una curva homogénea pero a medida que aumentamos la resolución la curva se va homogeneizando y mostrando mayor continuidad. En este caso, al analizar los valores máximos, a medida que aumenta la resolución, los valores de iluminancia crecen. El principio es el mismo que en el caso del punto p_2 . A mayor número de píxeles que abarque el área de estudio, mayor será la exactitud de los valores.

Figura 3.9. Al pixelarse una imagen, se pierde variedad de tonalidades debido a que se debe aplicar un valor homogéneo a cada píxel
(Elaboración propia, 2022)

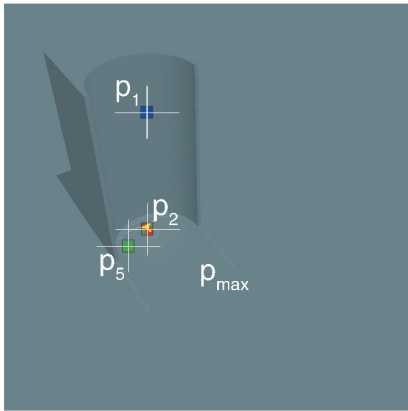
Figura 3.10. (Tres páginas siguientes) Resumen de los resultados del análisis de la resolución de la imagen
(Elaboración propia, 2022)

Finalmente, un punto muy importante que se debe reseñar es la variación del tiempo de computación (y también del tamaño del archivo) a medida que aumenta la resolución. Generar una única imagen a una resolución de 16384px x 16384px requiere un tiempo de más de 12 horas. Por lo que analizar una serie de 120 imágenes llevaría un periodo de más de 60 días, razón por la que el estudio con dicha resolución no cubre el mismo intervalo de tiempo que las demás resoluciones. Analizando calidad y tiempo de computación, una resolución de 4096px x 4096px podría ser buena, recurriendo a la de 8192px x 8192px en casos que necesiten de más precisión.

Análisis resoluciones de imagen

Objetivo Comprobar el efecto de la variación de la resolución de la imagen

Puntos estudiados



p_1 (1440px, 3000px)*

p_2 (1440px, 1820px)*

p_5 (1250px, 1650px)*

p_{max}

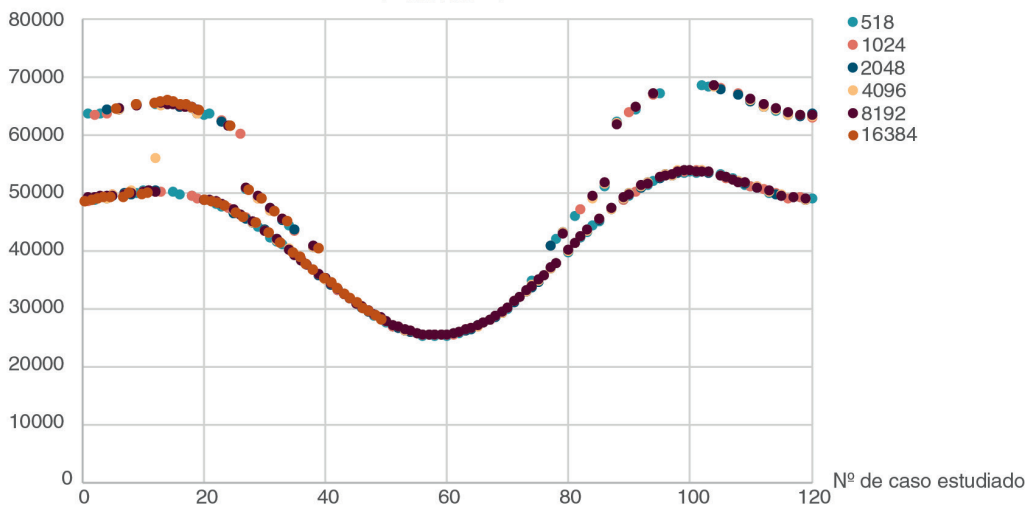
* coordenadas para una resolución de 4096px x 4096px

Datos

Volumetría	Volumen completo
Reflectividad	27%
Resoluciones estudiadas	518px x 518px 1024px x 1024px 2048px x 2048px 4096px x 4096px 8192px x 8192px 16384px x 16384px
Variación temporal	Todo el año cada 3 días a las 12:00
Total de imágenes	120 imágenes

Iluminancia

Punto 1

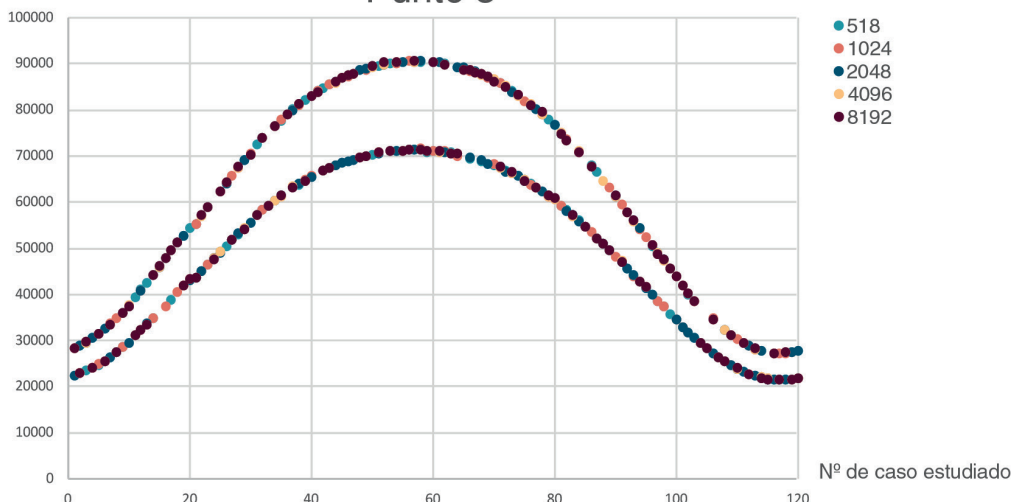


Punto 1

En el punto 1 no se aprecian diferencias importantes entre las distintas resoluciones debido a que no se encuentra en un área donde aparezcan cambios bruscos de iluminancia.

Iluminancia

Punto 5



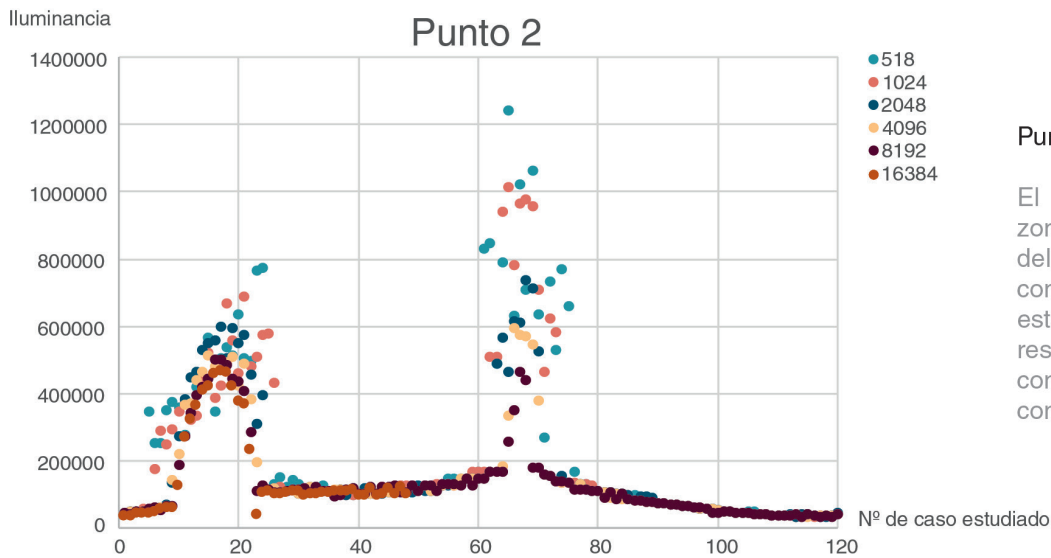
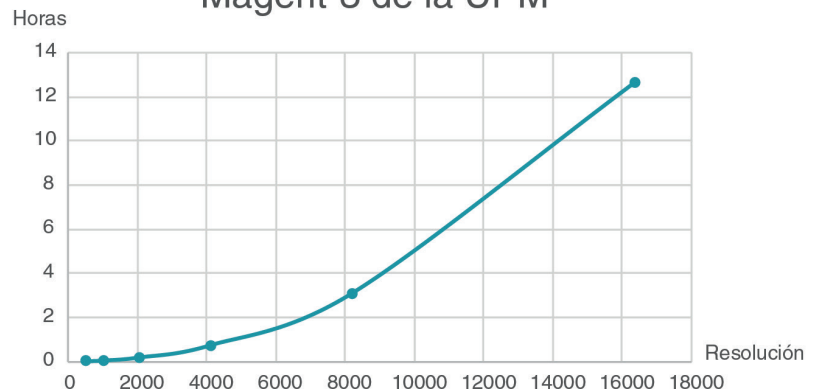
Punto 5

Al igual que en el punto anterior, no se aprecian grandes diferencias entre las distintas resoluciones de imagen.

Tiempo de computación en Magerit-3 de la UPM

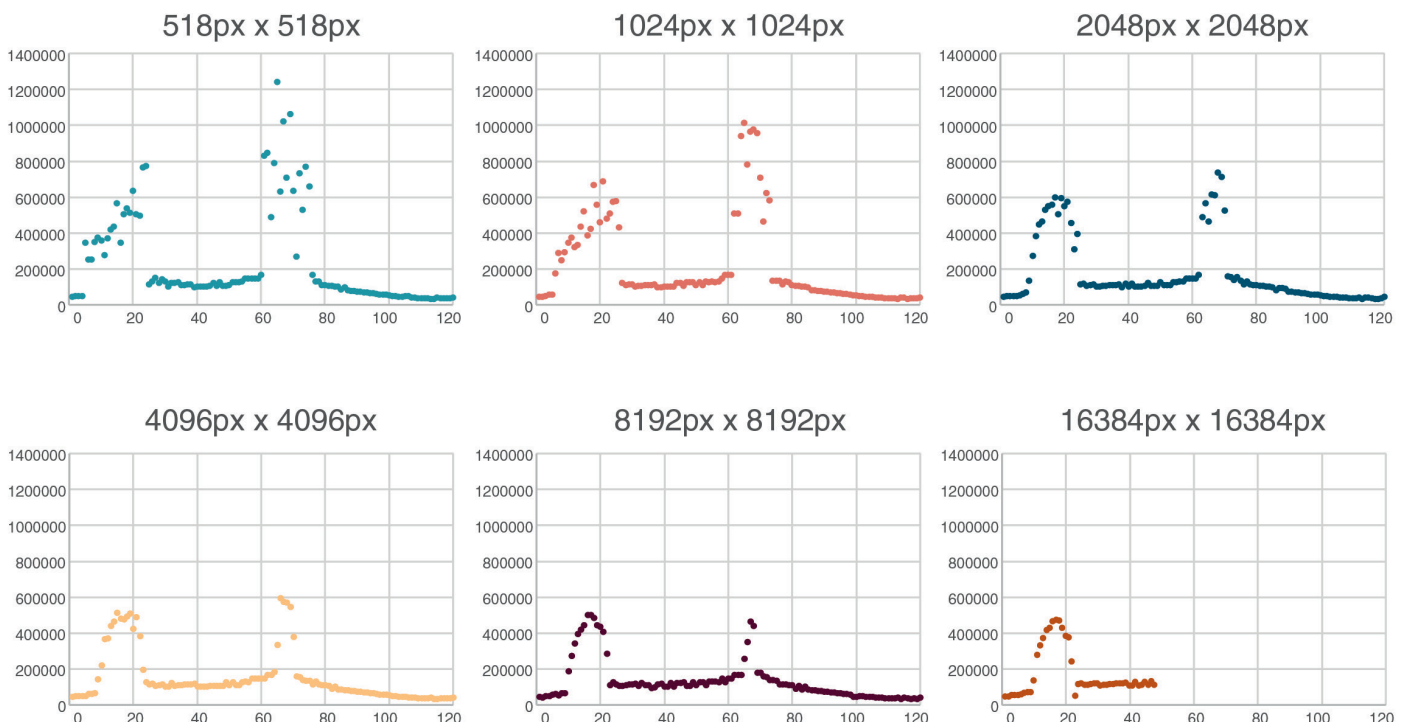
Comparativa de tiempos

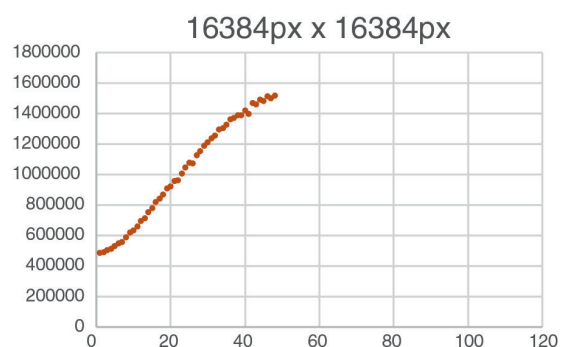
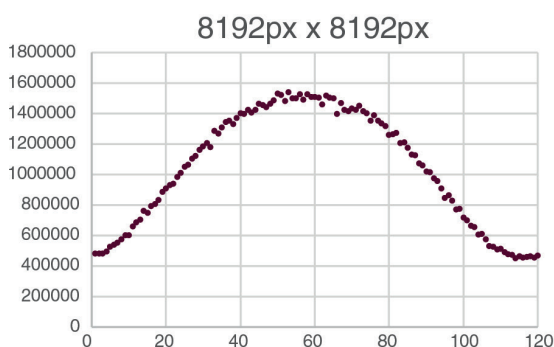
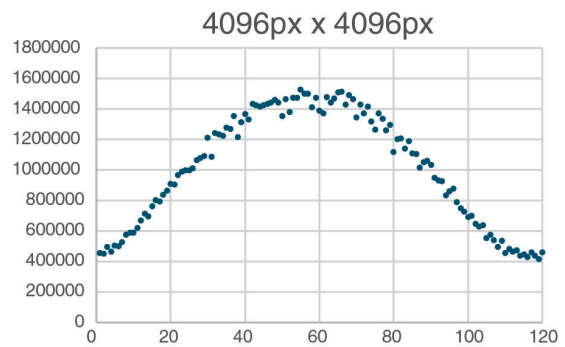
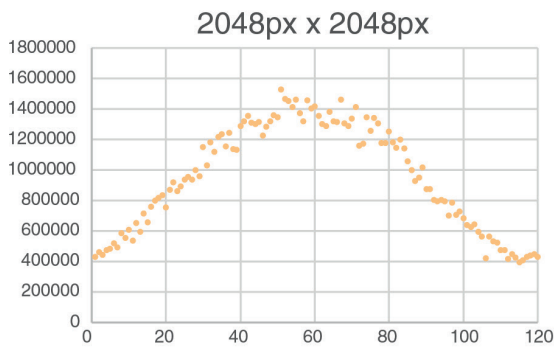
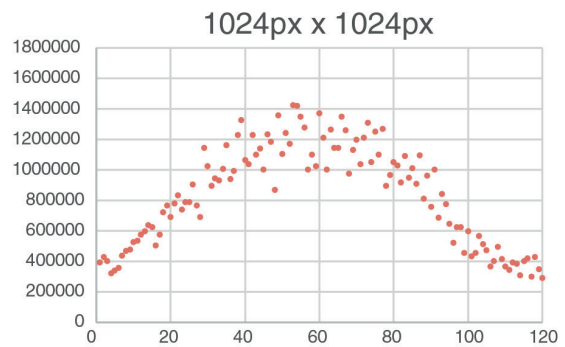
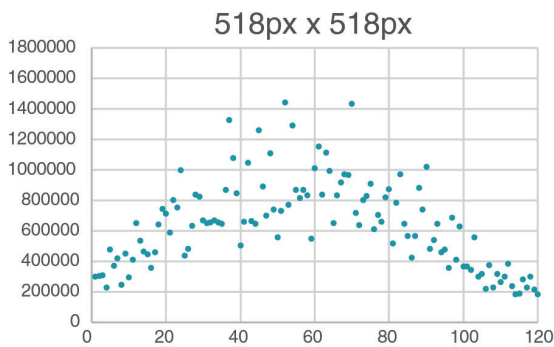
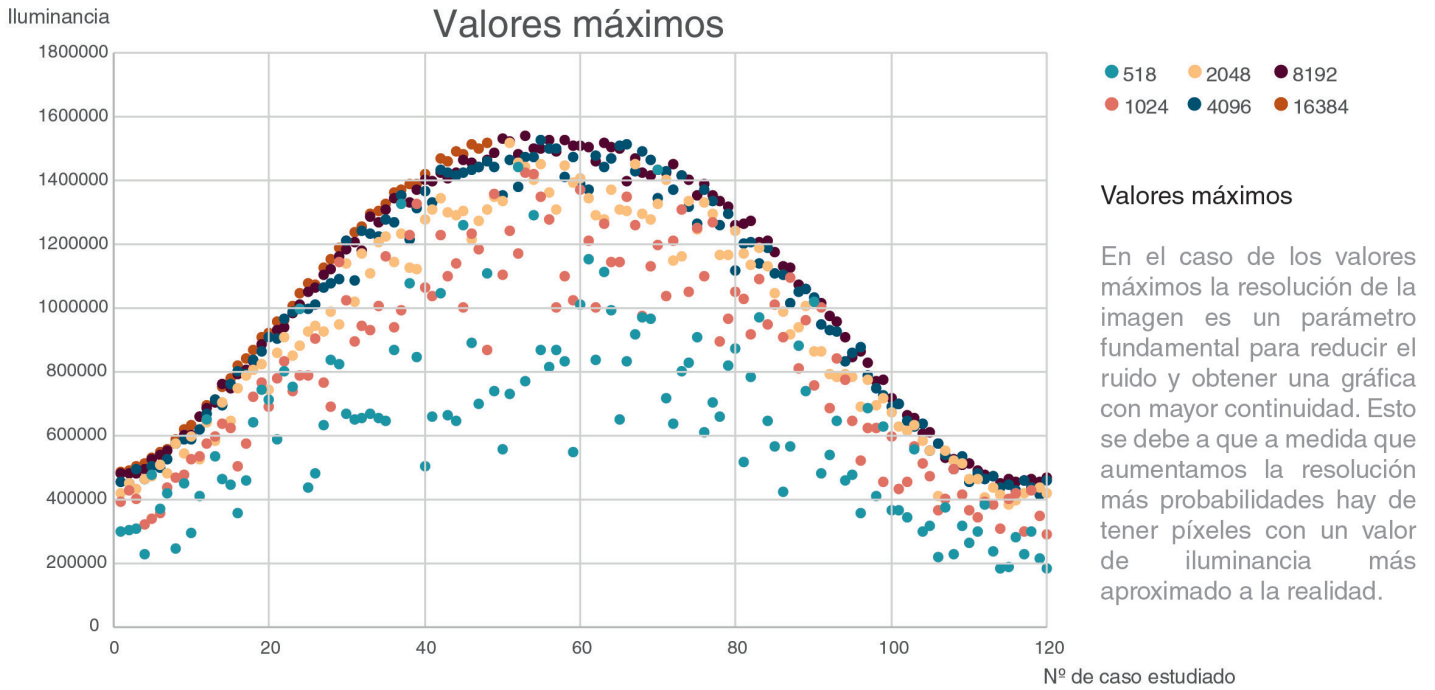
A medida que aumentamos la resolución de la imagen también aumenta el tiempo de cálculo. En la gráfica podemos apreciar como dicho aumento se produce de forma exponencial, por lo que resulta interesante establecer una relación entre la calidad de los resultados y el tiempo que resulte competitiva.



Punto 2

El punto 2 se sitúa en una zona donde en dos momentos del año se producen grandes concentraciones de rayos. Por esta razón, la variación de la resolución de la imagen contribuye a darle una mayor continuidad a la gráfica.





3.2.4. Análisis de la resolución de la geometría.

Radiance funciona a partir de geometrías generadas por polígonos, a pesar de estar representando superficies curvas. Esto implica que dependiendo de la cantidad de polígonos en los que se divida la superficie objeto de estudio va a afectar a la calidad de la misma, y en última instancia a la precisión de los resultados de reflectancia obtenidos. La geometría se puede generar directamente en Radiance mediante código o a través de un programa de dibujo asistido por ordenador. El flujo de trabajo en este caso, que es la opción elegida para este estudio, consiste en generar mediante el software de dibujo asistido por ordenador un archivo .obj que posteriormente será convertido a un archivo .rad mediante la función *obj2rad* de Radiance. Posteriormente, se genera una escena mediante la función *oconv* de Radiance.

Analizando la función *oconv* en el manual de Radiance (VVAA 2015), se especifica que puede ocurrir un error si muchos polígonos convergen en el mismo punto:

Set overflow in addobject (id)

This error occurs when too many surfaces are close together in a scene. Either too many surfaces are lying right on top of each other, or the bounding cube is inflated from an oversized object or an improper ?b specification. If hundreds of triangles come together at a common vertex, it may not be possible to create an octree from the object. This happens most often when inane CAD systems create spheres using a polar tessellation. Chances are, the surface "id" is near one of those causing the problem.

Trabajando con la geometría descrita en el punto 3.2.1. *Modelo y parámetros generales*. en la página 213, al aumentar el número de polígonos de la cara circular se generaban muchos triángulos en las caras superior e inferior de sólido que convergían en los vértices de la cara norte. Esto generaba que se produjera el error especificado. Por ello, optamos por modelar únicamente la fachada circular exenta. Previamente a hacer el estudio de la resolución geométrica se hizo la comprobación de que el trabajar con todo el volumen o solo con la fachada circular exenta no alteraba los resultados obtenidos.

La verificación de la geometría por tanto se realizó estudiando la fachada circular exenta con distintos grados de teselación. Se optó por tomar tres puntos de referencia más el punto de iluminancia máxima y analizar la variación de la iluminancia en dichos puntos a lo largo del año con distintos grados de teselación. Además, debido a la variación en la iluminancia máxima dependiendo de la resolución de imagen, se estudió en dos resoluciones, 4096px x 4096 px y 8192px x 8192px. Los puntos escogidos se representan en la Fig. 3.11.

Se realizaron tres niveles de teselación, el primero de ellos contaba con 2484 polígonos, el segundo con 1112 polígonos y el tercero con 786. Posteriormente se analizó una teselación mucho mayor correspondiente a 30422 polígonos para comparar con los anteriores casos. Sin embargo, esto conlleva mucho más tiempo de computación y tanto la serie de 4096 px como la de 8192 px no llegaron a completarse.

En la Fig. 3.11 se muestra el resumen de resultados. Los resultados muestran que a mayor cantidad de polígonos, el valor máximo de iluminancia aumenta. Esta variación se explica debido a que a mayor cantidad de polígonos mayor es la precisión del cálculo y por tanto la concentración de rayos en el punto de iluminancia máxima es mayor. Es decir, la zona de mayor iluminancia se concentra cada vez en un área menor y por tanto dicha iluminancia crece. Al ser el área menor, y como se vio en el apartado anterior 3.2.3. *Análisis de la resolución de imagen*. en la página 223, la continuidad de la curva se pierde y es necesario recurrir a mayores resoluciones de imagen, lo que consume aun mayor tiempo de computación.

Sin embargo, analizando los puntos p_1 y p_5 , ni la variación en el número de polígonos ni en la calidad de imagen parecen afectar a los resultados, que se sitúan en una de las dos curvas causadas por las franjas de luz que aparecen por la discretización de la superficie. El caso del punto p_1 con una mayor teselación produce un efecto de discontinuidad que se ve reducido al aumentar la resolución de la imagen.

En el caso del punto p_2 encontramos otras dos situaciones de discontinuidades analizando la gráfica. En el primer pico correspondiente aproximadamente entre los casos 10 y 20, a medida que aumentamos la resolución de la geometría también se ve aumentada la iluminancia aunque disminuye el número de casos en los que ocurre dicho pico. Si bien es cierto que a medida que aumenta la resolución de la geometría también disminuye la continuidad de la gráfica. Sin embargo, en el caso del segundo

pico, resulta interesante como desaparecen los grandes saltos a medida que aumenta la resolución. Esto se puede justificar debido a que a mayor resolución de la geometría menor es el área de concentración de dicha energía y por tanto el punto estudiado queda fuera de dicho área.

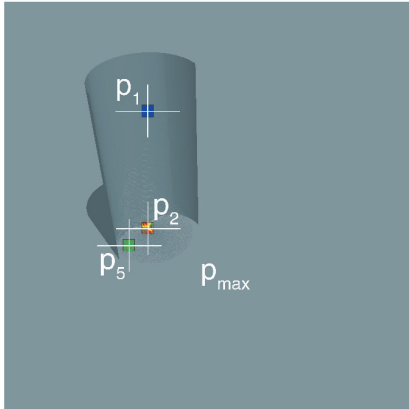
Aun así, refinar la geometría en el campo de estudio en el que nos encontramos no resulta primordial debido a que en la mayor parte de los edificios con envolventes curvas realmente los vidrios o paneles que se utilizan son planos, solo en algunos casos se utilizan vidrios o paneles curvos. Para conseguir una gran precisión en las simulaciones sería por tanto conveniente conocer la disposición exacta de los componentes que forman dicha geometría.

Figura 3.11. (Tres páginas siguientes) Resumen de los resultados del análisis de la resolución de la geometría (Elaboración propia, 2022)

Análisis de la resolución de la geometría

Objetivo Analizar la variación de los resultados atendiendo a la variación en la subdivisión de la geometría en un número mayor o menor de polígonos.

Puntos estudiados



P_1 (1440px, 3000px)*

P_2 (1440px, 1820px)*

P_5 (1250px, 1650px)*

P_{max}

*coordenadas para una resolución de 4096px x 4096px

Datos

Volumetría Superficie de fachada

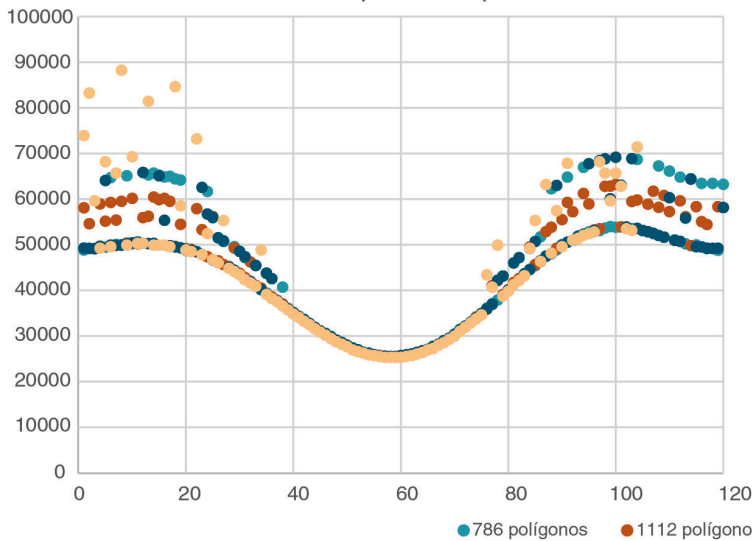
Reflectividad 27%

Resolución 4096px x 4096px
8192px x 8192px

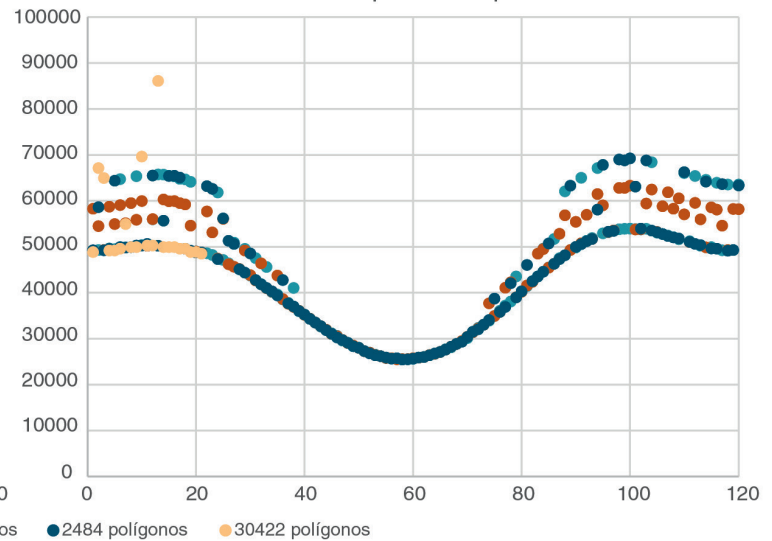
Variación temporal Todo el año cada 3 días a las 12:00

Total de imágenes 120 imágenes

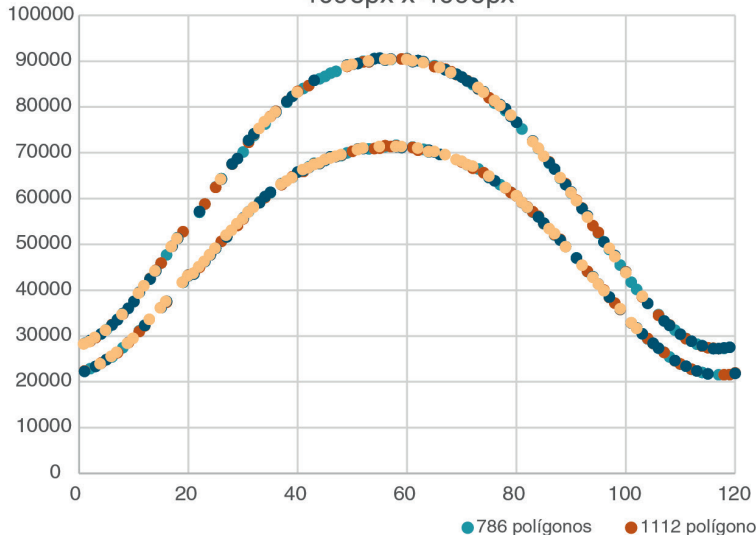
Punto 1
4096px x 4096px



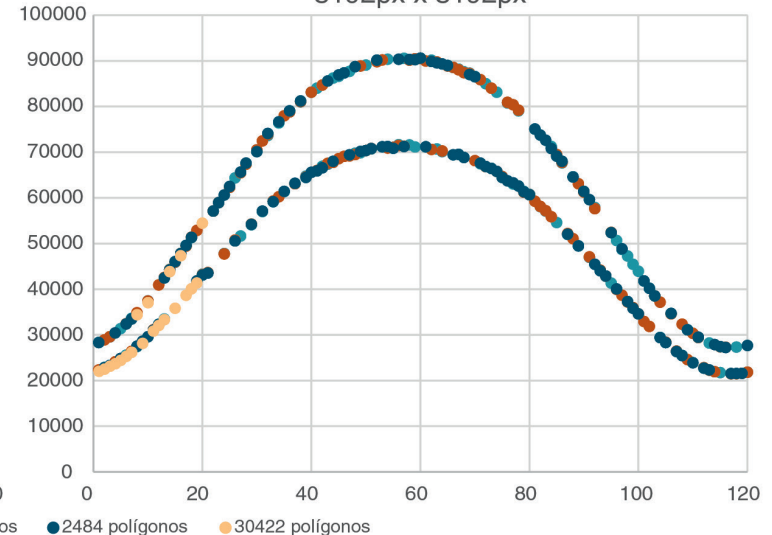
Punto 1
8192px x 8192px



Punto 5
4096px x 4096px



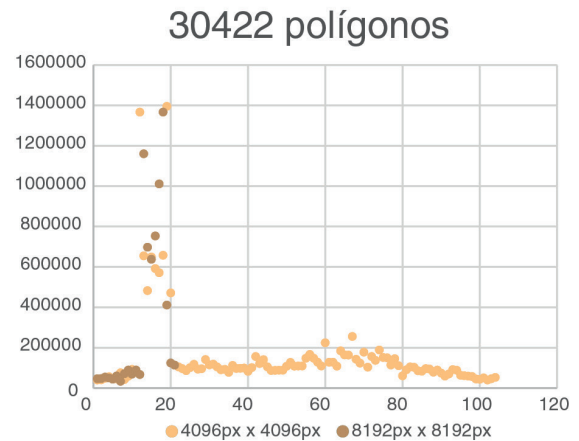
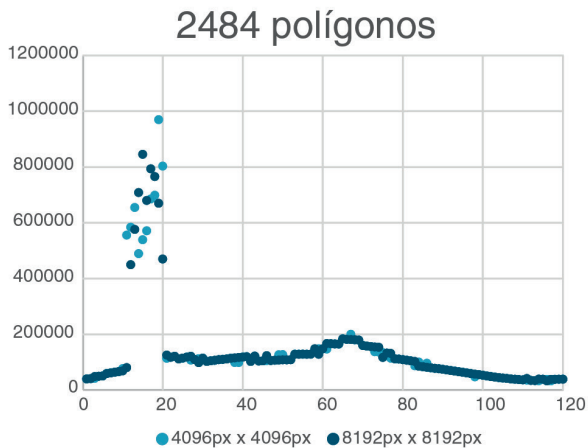
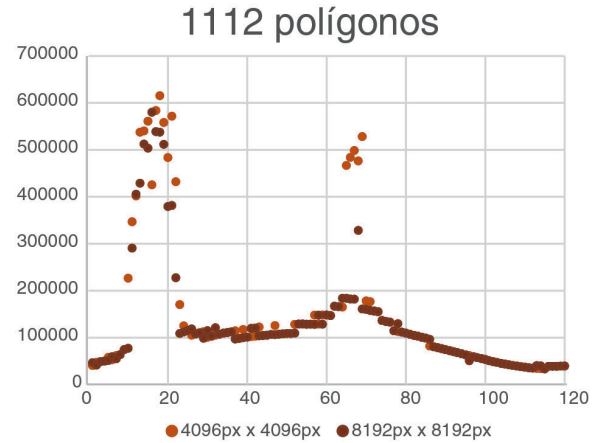
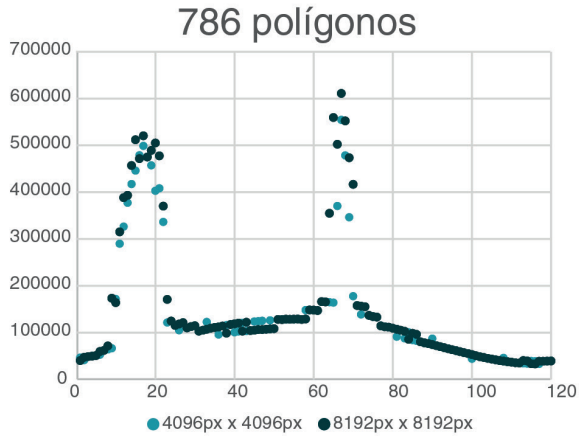
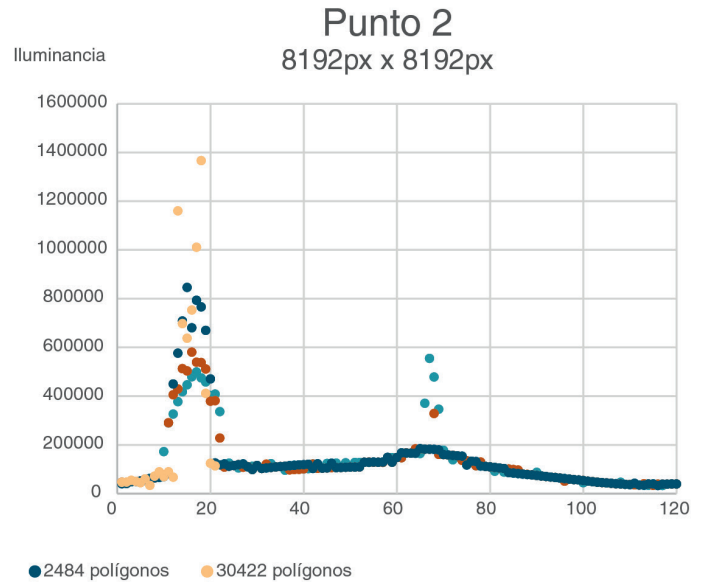
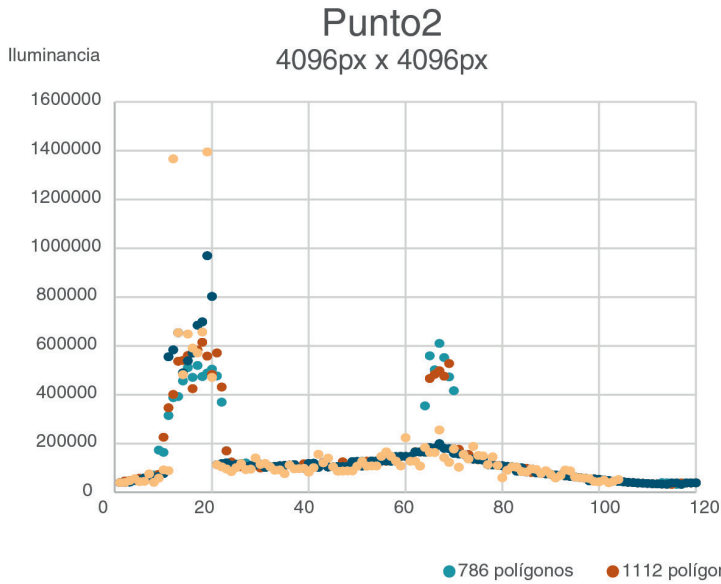
Punto 5
8192px x 8192px



Análisis de la resolución de la geometría

Punto 2

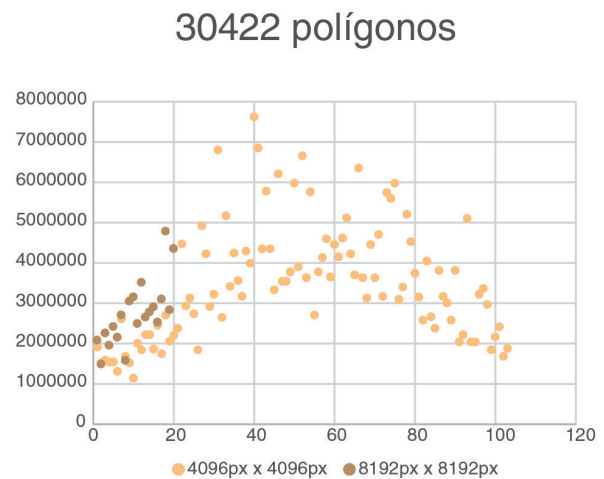
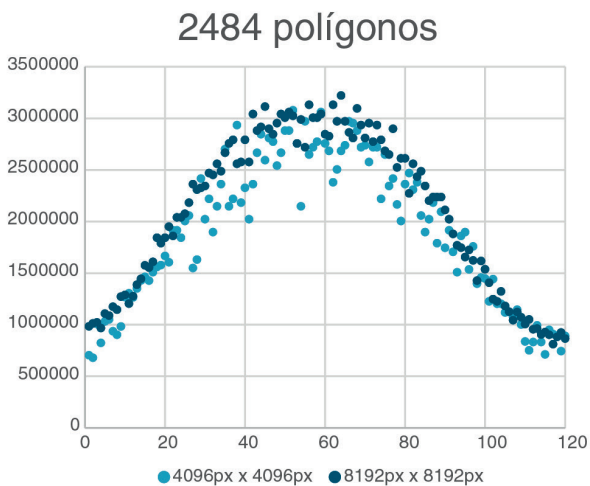
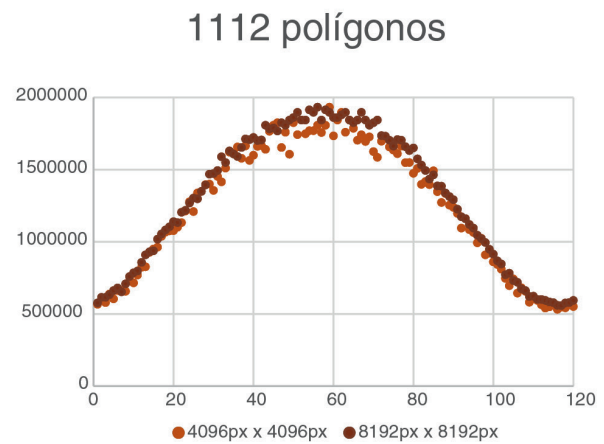
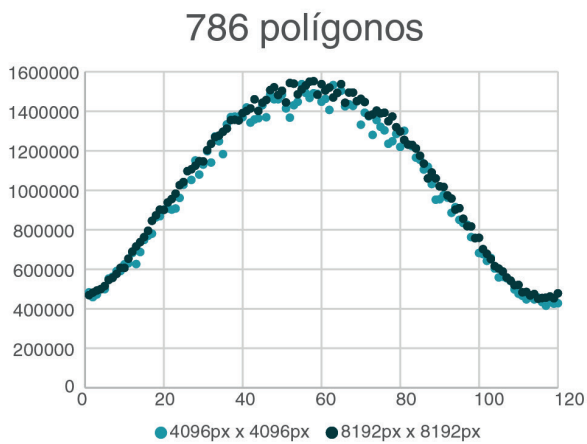
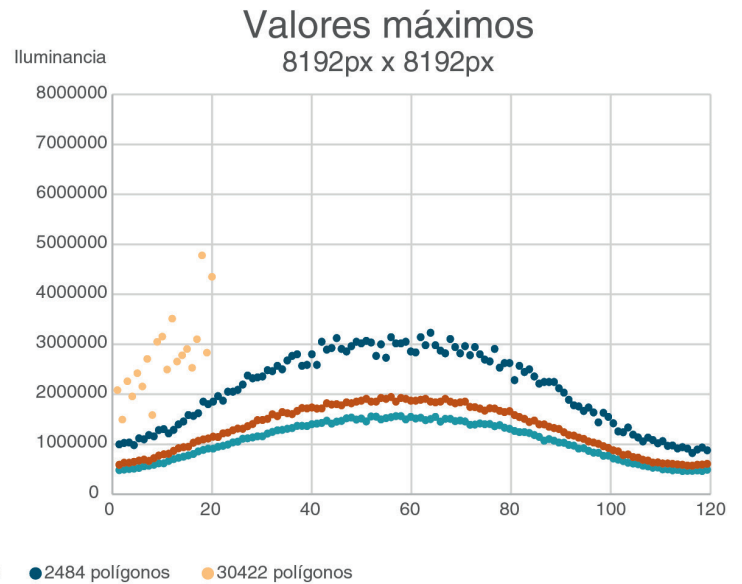
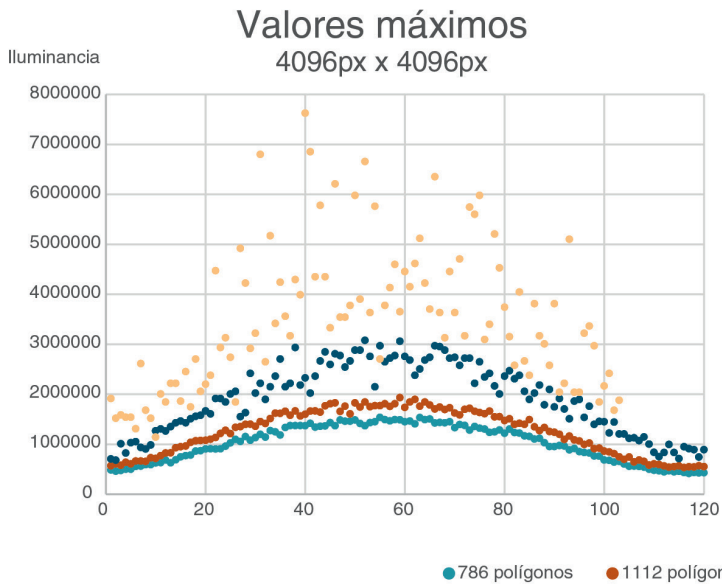
A diferencia de los puntos anteriores en los que apenas hay variación de iluminancia, en el caso del punto 2 se produce una reducción de iluminancia en el segundo pico mientras que en el primero aumenta la iluminancia al aumentar la resolución de la geometría.



Análisis de la resolución de la geometría

Valores máximos

A medida que aumenta el número de polígonos de la geometría, también aumenta la iluminancia máxima. Esto se debe a que una geometría como la estudia con más resolución concentra mayor cantidad de rayos en un área más pequeña, aumentando así la iluminancia.



3.2.5. Análisis de la saturación lumínica.

Posteriormente hemos analizado la variación de los resultados según el nivel de reflectancia en las superficies, debido a que en el manual de Radiance (VVAA 2015) se especifica que puede haber un *bug* cuando los colores son muy saturados, es decir, si los valores de iluminancia son muy altos. Por tanto, queríamos comprobar si las variaciones en los valores máximos de iluminancia se reducían con valores de reflectancia más bajos y aumentaban con valores de reflectancia más altos.

Para este caso solo hemos analizado los niveles de iluminancia en el punto máximo. Como era de esperar, a medida que aumenta la reflectancia también aumenta la iluminancia. Cabe reseñar que no conseguimos reproducir el *bug* mencionado. En la gráfica de iluminancia máxima de la Fig. 3.12 se puede apreciar un mayor número de discontinuidades en la gráfica a medida que se aumenta la reflectancia. Para comprobar si esta percepción era real normalizamos la iluminancia (tomamos el valor y lo dividimos por la reflectancia en tanto por uno). De esta forma podemos comprobar que no hay mayor ruido al aumentar la reflectancia.

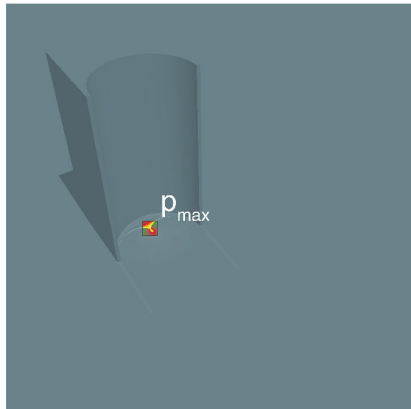
Los resultados muestran que como se planteaba en las hipótesis iniciales del trabajo, la reflectancia del material es un parámetro clave para el cálculo de la iluminancia y por tanto para la aparición de *rayos de la muerte*. En la gráfica podemos apreciar cómo, en un edificio circular como el estudiado, a partir de una reflectividad del material del 20% ya se supera el valor de 1.000.000 lux y que un aumento de 20 puntos en la reflectancia produce aproximadamente un aumento de 1.000.000 lux. De este cálculo podemos extraer que en las circunstancias del estudio nos moveremos en zona segura si no superamos una reflectancia del 20% en el material de fachada.

Figura 3.12. Resumen de los resultados del análisis de la variación de la reflectividad (Elaboración propia, 2022)

Análisis reflectividad

Objetivo Comprobar cómo afecta la variación de la reflectividad en la iluminancia

Puntos estudiados

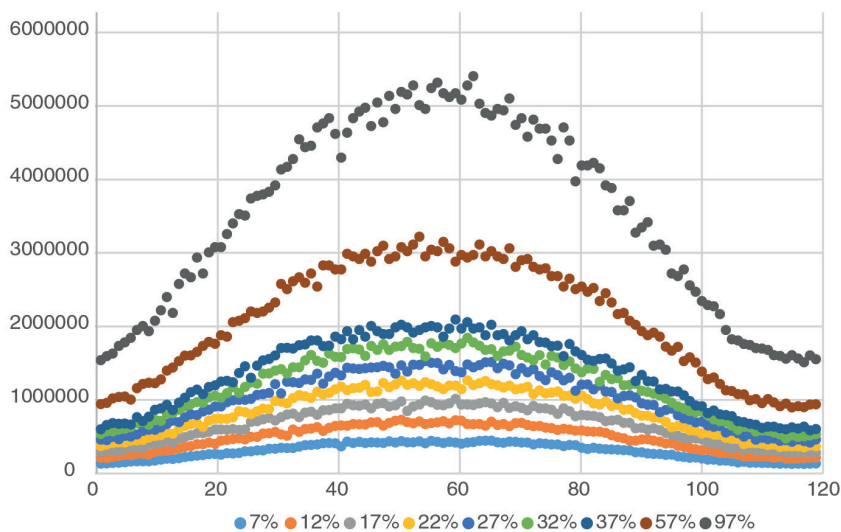


Máximos

Datos

Volumetría	Volumen completo
Reflectividad	Entre 7% y 97%
Resolución	4096px x 4096px
Variación temporal	Todo el año cada 3 días a las 12:00
Total de imágenes	120 imágenes

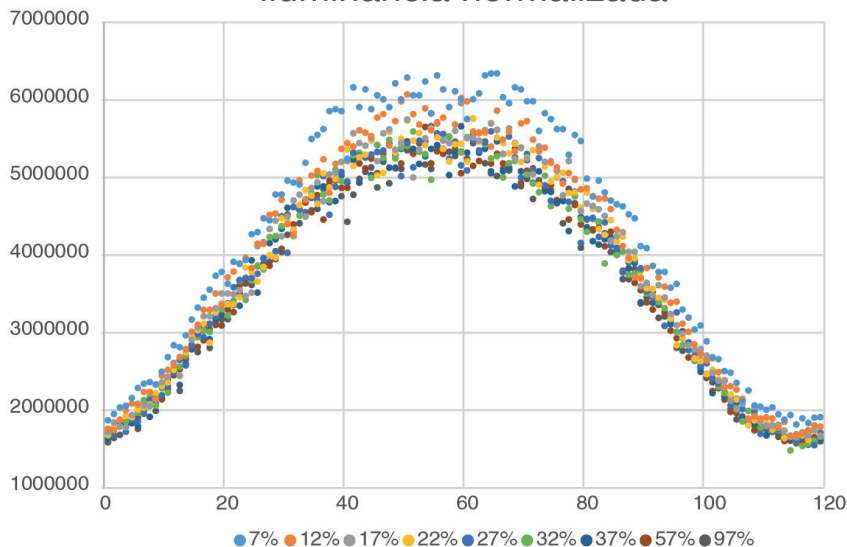
Iluminancia



Iluminancia máxima

Como es de esperar, a medida que aumenta la reflectividad de la fachada también aumenta el valor de iluminancia máxima.

Iluminancia normalizada



Iluminancia normalizada

Para analizar el ruido en los datos se procedió a normalizar la iluminancia dividiendo la iluminancia máxima entre la reflectancia en tanto por uno. Los resultados muestran niveles algo mayores de ruido en reflectancias más bajas.

3.2.6. Estudio de un caso publicado.

Tras haber realizado las comprobaciones detalladas en el capítulo 3.2. *Validación*. en la página 213, quisimos validar la metodología de trabajo comparándola con los resultados de algún estudio similar. Para ello, tomamos como referencia el artículo *Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London* (Zhu, Jahn, y Rein 2019).

El caso del 20 de Fenchurch Street.

El día 29 de agosto de 2013 se produjo un incidente a causa de un *rayo de la muerte* reflejado desde el edificio del 20 de Fenchurch Street en Londres. La concentración de rayos fue capaz de derretir algunos elementos plásticos de un coche que se encontraba estacionado en una calle aledaña. El incidente se reportó tanto en medios nacionales como internacionales a partir de septiembre del mismo año, convirtiéndose así en uno de los casos de *rayo de la muerte* más conocidos.

El arquitecto Rafael Viñoly reconoció que sí que eran conscientes de que la forma del edificio concentraría la radiación solar pero que no habían previsto que la acumulación energética fuera tan elevada (Wainwright 2013). En la misma entrevista comenta que no tenían las herramientas o el *software* necesario para analizar este fenómeno con claridad.

La forma del edificio se corresponde en su fachada sur con un espejo parabólico (Fig. 3.13). Esa fachada es completamente de vidrio y hasta el momento del incidente dicho vidrio no había sido tratado. Dicha forma, sumada a las características del material, produjo que se formara un *rayo de la muerte*.

Figura 3.13. Rafael Viñoly, 20 de Fenchurch Street (35mmMan, 2020, Flickr / CC BY 2.0)



Metodología.

La metodología empleada en esta investigación difiere de la empleada por Zhu, Jahn, y Rein (2019). Sin embargo, en ambos casos se empleó el programa RADIANCE.

La metodología se divide en dos etapas. En la primera etapa se debe preparar la simulación. Para ello, la metodología seguida fue muy similar a la del artículo de referencia.

El primer paso en la preparación de la simulación fue la de establecer el modelo tridimensional del edificio y su entorno. Para ello se recurrió a la documentación del edificio. Si bien es cierto que en esta fase de modelado no encontramos apenas documentación técnica por lo que es probable que el modelo utilizado difiera del de los otros investigadores. Los edificios del entorno se modelaron mediante paralelepípedos aproximados a la volumetría real del edificio, ya que no estábamos considerando un estudio de detalle sobre los mismos.

Tras determinar la geometría fue preciso definir los materiales de la escena. Para poder obtener unos resultados similares a los del artículo de referencia era preciso utilizar las mismas características materiales. Sin embargo, hay algunas características que no aparecen indicadas, por lo que la definición de los materiales probablemente no sea exactamente la misma, causando así algunas desviaciones en los resultados. En los anexos aparece la definición detallada de los materiales. Al vidrio utilizado se le ha asignado una reflectancia del 30 %. A los edificios adyacentes se les ha asignado el material *Cement Brick 2* de la lista de materiales de los archivos auxiliares de la Radiance (*lib/lib/material.rad*) y al suelo el material *Shiny Black Granite* también incluido en dicha lista.

Para determinar el punto de vista desde donde realizaríamos las simulaciones utilizamos una perspectiva lo más similar posible al artículo de referencia, es decir, una perspectiva cónica con el punto de vista a la altura de la zona superior del 20 de Fenchurch Street.

Sin embargo, para la segunda etapa realizamos varias series de simulaciones tras haber concretado los intervalos temporales. Este sistema difiere del utilizado por los autores del artículo de referencia ya que ellos utilizan un sistema de azimuth y elevación. Sin embargo, consideramos de mayor interés utilizar un sistema temporal que un sistema posicional (definiendo la posición solar). Las magnitudes en las que se ha llevado a cabo el estudio son magnitudes radiométricas, es decir W/m^2 .

Los días estudiados han sido el día 29 de agosto de 2013 debido a que fue el día en el que se produjo el incidente en el vehículo aparcado en la vía pública. Además, los autores del artículo (Zhu, Jahn, y Rein 2019) determinaron que el día donde se producía el máximo de irradiancia coincidía con el 12 de octubre, por lo que también hemos estudiado dicho día para comparar los valores obtenidos.

Se determinó una serie de simulaciones para el día 29 de agosto de 2013 en un periodo de 11:00 a 13:40 GMT en intervalos de 20 minutos, que son los estudiados por los autores. Posteriormente se realizó una serie de simulaciones para el día 12 de octubre en el periodo de 11:00 a 13:40 GMT en intervalos de 20 minutos. Dicha serie correspondiente al día 12 de octubre se realizó con un modelo de distribución de iluminancia de *clear sky* para el cálculo de los valores máximos, ya que el cielo despejado es el que da dichos valores. En el caso del 29 de agosto de 2013 también se simuló con

el modelo *clear sky* debido a que son las condiciones en las que se produjo el incidente de dicho día.

Finalmente, también se realizó una serie de simulaciones a lo largo de todo el año cada 3 días a las 13:00, 13:20 y 13:40, haciendo un total de 360 simulaciones, con el objetivo de analizar la variación del valor máximo de irradiancia.

Resultados y discusión.

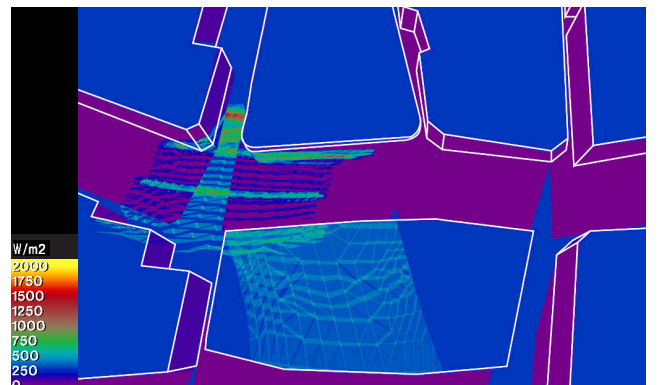
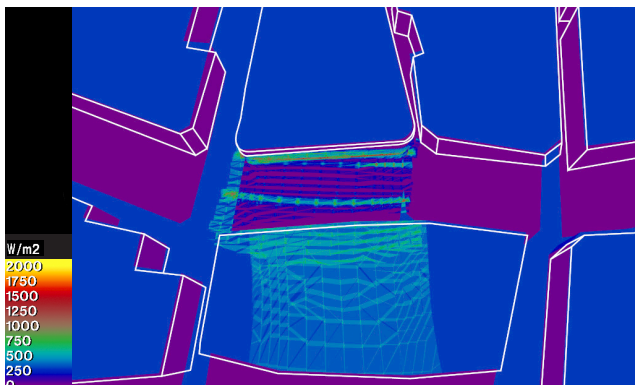
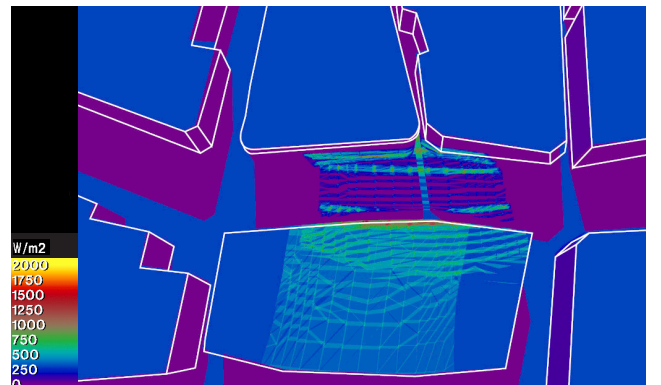
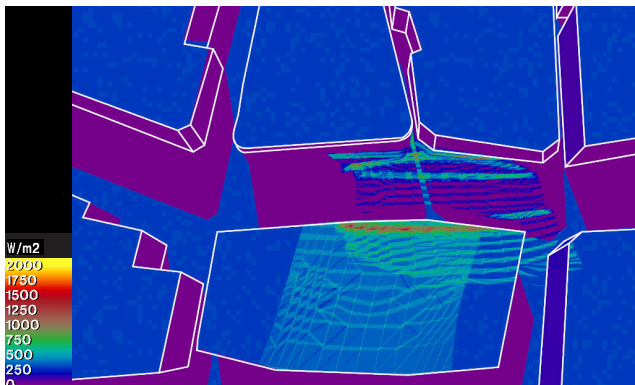
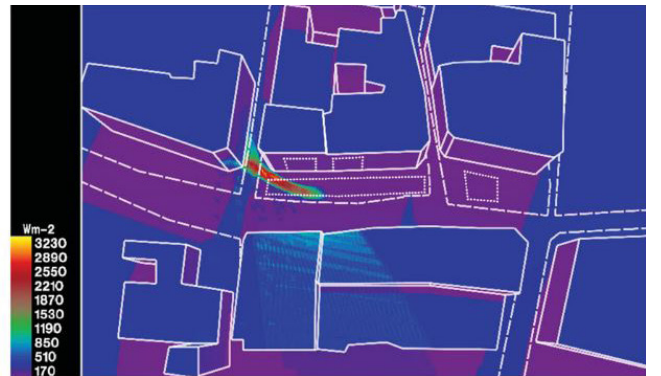
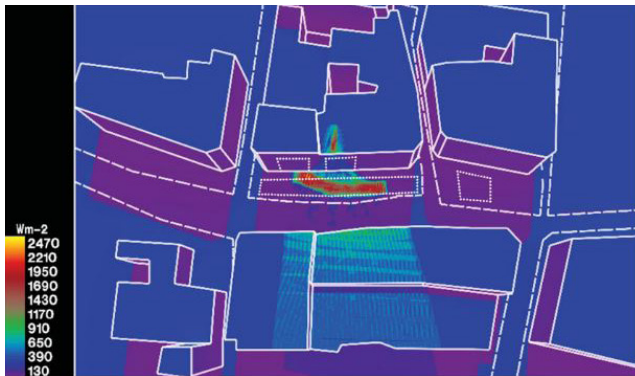
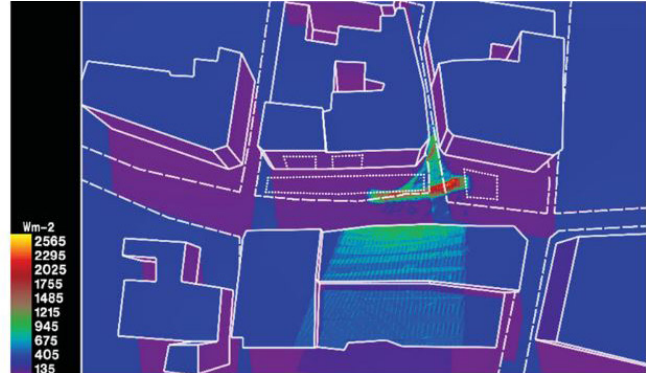
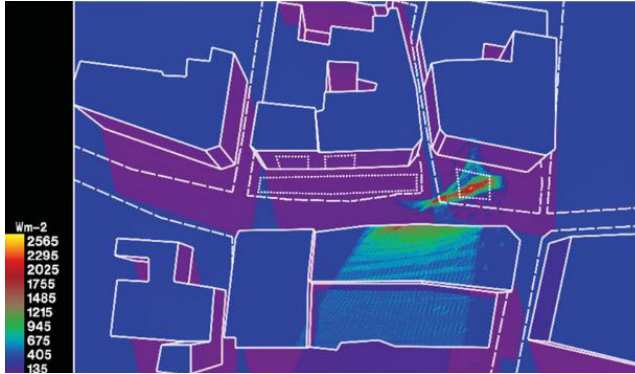
Lo primero que comprobamos fue el valor base de irradiancia (el nivel de irradiancia en las zonas no afectadas por los edificios), que en nuestro caso variaba entre los 265 y los 303 W/m² para los casos estudiados el 29 de agosto. Aunque en el artículo de referencia no se especifica dicho valor de base, en las imágenes adjuntas (Fig. 3.14) se puede establecer un valor aproximado de entre 350 y 400 W/m². Dicha diferencia se puede ver producida por alguna diferencia en los parámetros al generar la luz, así como por las características del suelo y el cielo definidos. Al ser una diferencia de alrededor del 30%, se han multiplicado los resultados obtenidos por 1,3.

Simulación del 29 de agosto de 2013.

En la simulación correspondiente al día 29 de agosto se obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos en el artículo (Fig. 3.15). Las áreas afectadas se sitúan en la misma posición que en el estudio original. Aun así, al comparar las imágenes, se observa que la geometría del edificio no resulta exactamente la misma, presentando aparentemente menor definición de la geometría el modelo utilizado en este trabajo. El reflejo del edificio modelado por la autora parece doblarse sobre sí mismo, indicando que es posible que tenga una curvatura vertical mayor de la que presenta el edificio original. Además, el área que abarca el reflejo es más

Figura 3.14. (Cuatro imágenes superiores) Resultados obtenidos por los autores del artículo de referencia para el 29 de agosto de 2013: (Arriba izquierda) a las 11:40, (Arriba derecha) a las 12:00, (Abajo izquierda) a las 12:40 y (Abajo derecha) a las 13:20 (Zhu, J., Jahn, W. y Rein, G. (2019) «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London», *Journal of Building Performance Simulation*, 12(4), p. 384)

Figura 3.15. (Cuatro imágenes inferiores) Resultados obtenidos para el 29 de agosto de 2013: (Arriba izquierda) a las 11:40, (Arriba derecha) a las 12:00, (Abajo izquierda) a las 12:40 y (Abajo derecha) a las 13:20 (Elaboración propia, 2022)



ancha que la del ejemplo. Esto no parece suponer un problema especialmente relevante para determinar las zonas en las que se puede producir el fenómeno de *rayo de la muerte*.

Por otro lado, analizando los valores obtenidos, con una reflectancia del vidrio de un 30 % y tras haber aplicado la corrección comentada previamente, los máximos obtenidos son ligeramente más bajos que los obtenidos en el artículo con una diferencia de entre un 15 y un 60%. El principal problema de esta simulación es que no conocemos la definición exacta de los materiales empleados por los autores, así como otros factores que pueden afectar a la simulación. Al no conocer dicha definición es muy difícil obtener los mismos valores. Además, como hemos visto previamente, diferencias en parámetros como la resolución de la imagen o la resolución de la geometría pueden producir cambios en los valores obtenidos. Aun así, los valores obtenidos también son indicativos de altas concentraciones energéticas y las zonas afectadas son coincidentes con el estudio de referencia.

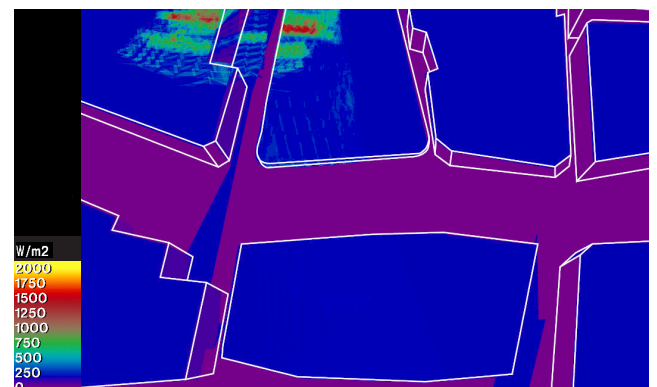
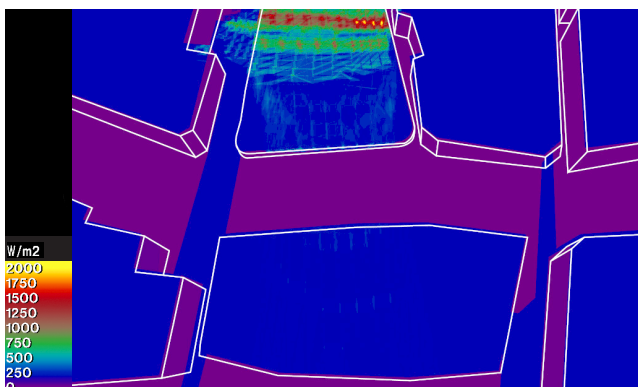
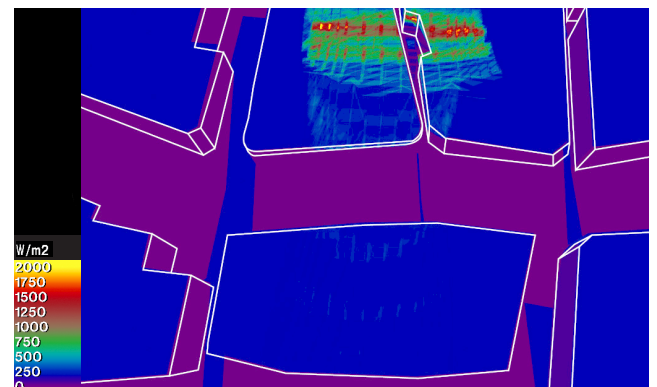
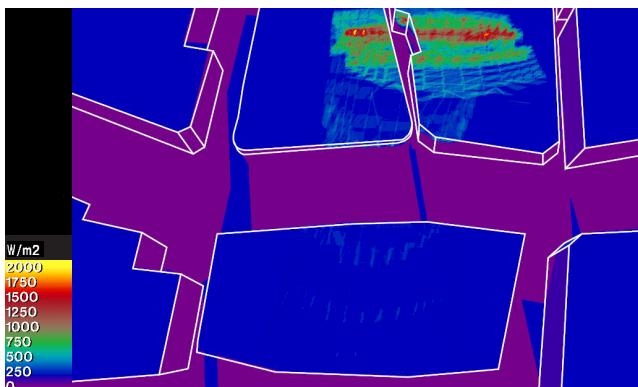
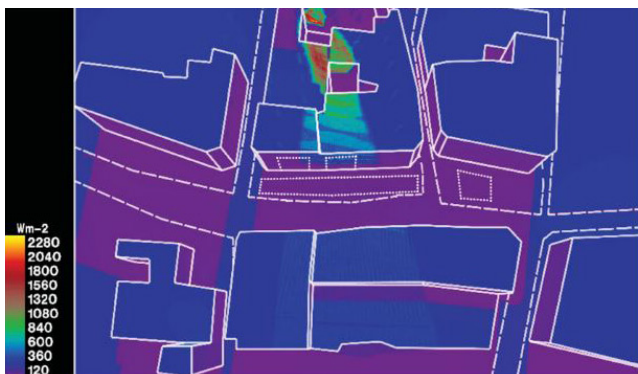
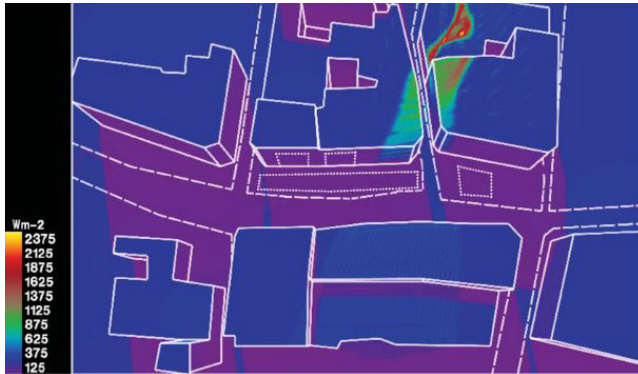
Simulación del 12 de octubre de 2013.

En la simulación correspondiente al 12 de octubre hemos encontrado diferencias más significativas, cuyos resultados se pueden comparar en las Fig. 3.16 y Fig. 3.17.

A nivel geométrico se aprecian algunas diferencias con respecto a la simulación del artículo, aunque la zona coincide. Lo más probable, como en el caso anterior, es que se deba a la geometría del modelo. En este caso, la franja de irradiancia en la simulación de este trabajo es mucho más horizontal que la del artículo con el que se compara, lo que puede indicar que la curvatura en el plano horizontal del modelo es menor que la real.

Figura 3.16. (Cuatro imágenes superiores) Resultados obtenidos por los autores del artículo de referencia para el 12 de octubre de 2013: (Arriba izquierda) a las 11:40, (Arriba derecha) a las 12:00, (Abajo izquierda) a las 12:40 y (Abajo derecha) a las 13:20 (Zhu, J., Jahn, W. y Rein, G. (2019) «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London», *Journal of Building Performance Simulation*, 12(4), p. 385)

Figura 3.17. (Cuatro imágenes inferiores) Resultados obtenidos para el 12 de octubre de 2013: (Arriba izquierda) a las 11:40, (Arriba derecha) a las 12:00, (Abajo izquierda) a las 12:40 y (Abajo derecha) a las 13:20 (Elaboración propia, 2022)



En cuanto a los valores obtenidos son mucho más bajos de los obtenidos por los autores del artículo. Para el 12 de octubre el valor más alto obtenido con la ponderación del 30% es de 2964 W/m² a las 12:00, siendo este valor a las 13:40, momento en el que en el artículo de referencia establecen como pico, de 1859 W/m². En el artículo de referencia dicho valor se sitúa en los 4176 W/m², lo que implica una diferencia del 124% con los datos obtenidos.

En este caso la diferencia es muy grande como para considerarla consecuencia del desconocimiento de otros parámetros como la reflectancia del vidrio. Por eso, y al analizar también la diferencia en la radiación solar base, la explicación que vimos más plausible fue un error en los experimentos del artículo en cuestión. Sin embargo, para corroborar la viabilidad de los datos obtenidos, se desarrolló un análisis de la variación del valor máximo a lo largo de todo el año.

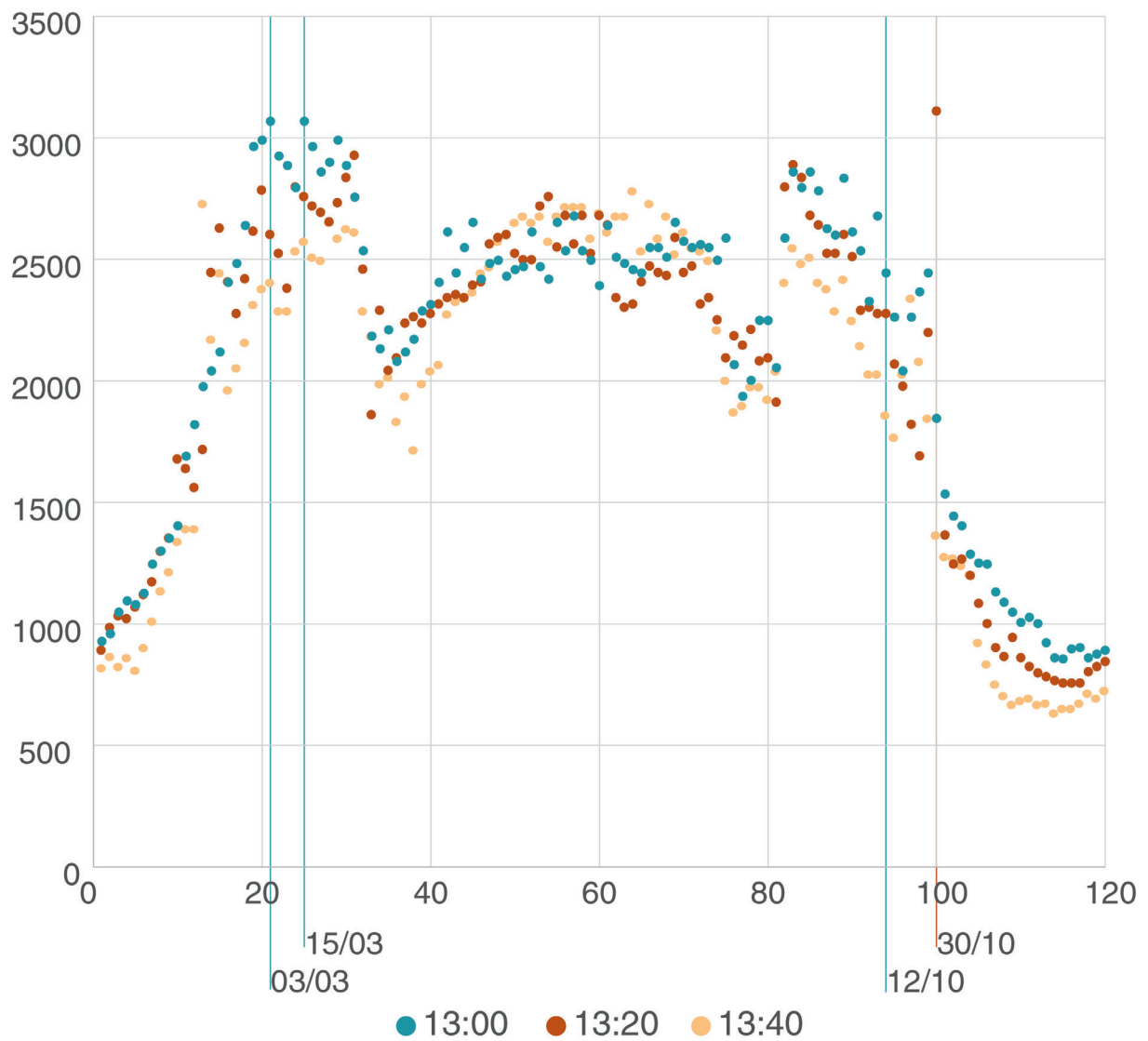
Análisis de la variación del valor máximo.

Debido a que los valores obtenidos para la simulación del 12 de octubre se distanciaban de los obtenidos por los investigadores, se decidió analizar el valor máximo de irradiancia a lo largo del año a las 13:00, 13:20 y 13:40, siendo esta última hora cuando se produce el pico de irradiancia en el artículo modelo. De esta forma se podría analizar cuándo se produce el pico en nuestra simulación.

Si analizamos la gráfica de la Fig. 3.18, encontramos que en los días centrales del año, cuando los resultados debían de ser máximos se produce un descenso de irradiancia. Esto se debe a la propia forma del edificio, ya que cuando los rayos solares son más verticales el edificio genera una sombra propia sobre sí mismo que reduce la superficie reflectante.

Figura 3.18. Gráfica de iluminancia máxima a las 13:00, 13:20 y 13:40 a lo largo de todo el año (Elaboración propia, 2022)

Valor máximo de irradiancia



Por tanto, los valores máximos de irradiancia se alcanzan en los meses de primavera/otoño, como bien aclaran en el artículo de referencia. Sin embargo en nuestra simulación, los valores máximos se obtienen el 3 y 15 de marzo a las 13:00, excluyendo el máximo del 30 de octubre que se considera un error porque se sale de la gráfica. En el lado derecho de la gráfica, los valores de otoño máximos se sitúan el 9 y 15 de septiembre, manteniendo cierta simetría con los valores primaverales. El 12 de octubre no se encuentra dentro de los días en los que se registran valores máximos.

Conclusiones.

A través de estas simulaciones se ha establecido una metodología que se ha podido validar mediante la comparación con los datos obtenidos por otros investigadores. Los datos obtenidos reflejan buenos resultados tanto a nivel geométrico como a nivel cuantitativo, teniendo en cuenta que los datos de partida no son exactamente coincidentes. Sin embargo, los datos del pico máximo de iluminancia difieren de los obtenidos por los otros investigadores. Como se ha comentado, existen indicios que podrían indicarnos algún error en los datos obtenidos por los autores del artículo comparativo debido a las diferencias obtenidas.

Tras el análisis de la iluminancia máxima a lo largo del año se ha podido comprobar el sentido físico de los resultados obtenidos y la viabilidad de dichos datos.



Parte 4 Caso de Estudio

4.1.	Palazzo Lombardia. Milán.	253
4.1.1.	Descripción del escenario.	253
4.1.2.	Procedimiento.	256
4.1.3.	Resultados.	268
4.1.4.	Conclusiones acerca del caso de estudio.	282



4.1. Palazzo Lombardia. Milán.

4.1.1. Descripción del escenario.

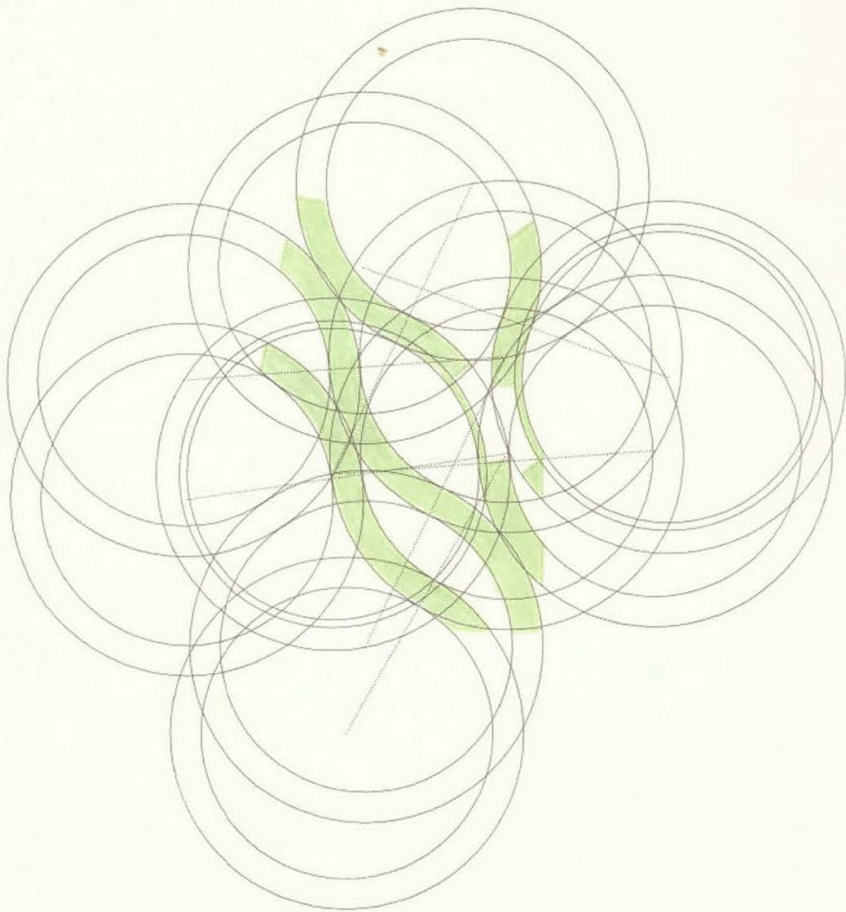
El Palazzo Lombardia.

El Palazzo Lombardia (Fig. 4.1) es la actual sede del gobierno regional de Lombardía. En 2003 se decidió convocar un concurso internacional para la Sede de la Región Lombarda. Este proyecto se enmarcaba dentro de un plan urbano más grande para el área Garibaldi-Repubblica. En 2004 se proclamó finalmente ganador al estudio Pei Cobb Freed & Partners. Las obras comenzaron en octubre de 2006 (Regione Lombardia 2022) y se prolongaron hasta 2010.

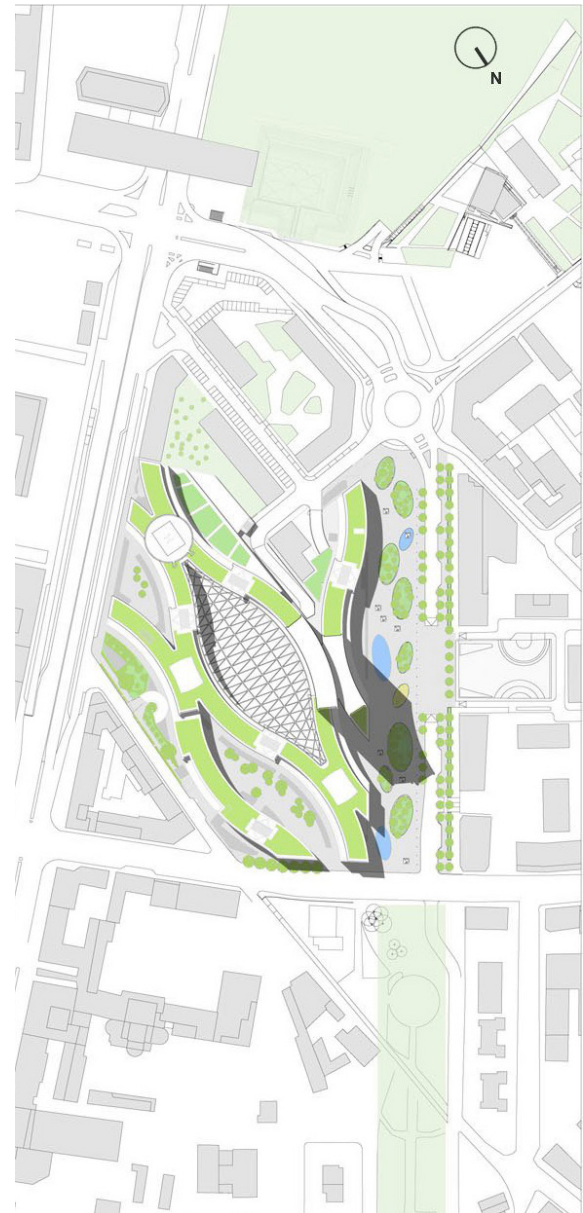
Este edificio consta de cuatro cuerpos bajos con una forma serpenteante en planta a partir de arcos de circunferencias (Fig. 4.2 y 4.3). Estos cuatro cuerpos son tangentes en algunas zonas donde se produce la conexión entre edificios. La forma de la planta produce una sucesión de zonas de curvatura cóncava y convexa. Dispone, además, de una torre alta dividida en dos cuerpos conectados con una curvatura cóncava al exterior.

Dentro de las características materiales de la fachada del edificio, encontramos en las paredes curvas del edificio una piel de vidrio formada a partir de dos muros cortina a la que han denominado *Climate Wall* que abarca una superficie de unos 55.000 metros cuadrados. Esta *Climate Wall* se compone de un primer muro cortina de vidrio Ipasol neutro 57/32 con un vidrio externo de 10 mm con tratamiento en la cara interior, una cámara rellena de argón de 16mm y una cara de vidrio laminado 44.2 o 88.2 y un segundo muro de vidrio laminado 44.2 o 88.2 y aperturas para mantenimiento

Figura 4.1. Pei Cobb Freed & Partners, Palazzo Lombardia (Mauro Gambini, 2010, Flickr/CC BY-NC-ND 2.0)



24 Circles in Search of a Building: Alta Sede Regione Lombardia
Hirchi
15.XII.08



(ISA S.p.A. 2010; Oldrati 2010). Dentro de los datos suministrados por la empresa constructora (ISA S.p.A. 2010) se indica que el vidrio utilizado presenta un factor solar de 32%, una transmisión de luz del 57% y una transmitancia térmica de 1,1 W/m²K.

Por otro lado las paredes rectas del edificio tienen un revestimiento. Aquellas correspondientes a la pared sur de la torre están formadas por una fachada fotovoltaica, mientras que las fachadas rectas de los extremos del edificio, donde las formas curvas se intersecan con las calles, son muros opacos con un revestimiento de un material pétreo.

Problemática durante la construcción.

El Palazzo Lombardia comenzó su construcción en 2006, construcción que se prolongó hasta principios de 2010. Durante este periodo, y más concretamente en 2009 a partir de la colocación de los paneles de vidrio en el edificio, los vecinos reportaron problemas en las carpinterías y persianas de su edificio debidos a los reflejos de los rayos solares en la fachada del edificio. La prensa (Carlucci 2009) reportó que estos reflejos habían hecho que las persianas del edificio se fundieran. Según las temperaturas registradas por los vecinos, se llegó a alcanzar una temperatura superficial en los muros de 53 °C, aunque es probable que fueran mayores debido a que fueron capaces de fundir el PVC de las persianas, cuya temperatura operativa es de máximo 60 °C y el rango de temperaturas de fusión se sitúa entre 100 °C y 260 °C.

Figura 4.2. (Izquierda) Boceto sobre la concepción geométrica del Palazzo Lombardia. (Pei Cobb Freed & Partners: <https://www.pcf-p.com/projects/palazzo-lombardia/>)

Figura 4.3. (Derecha) Plano de situación del Palazzo Lombardia. (Pei Cobb Freed & Partners: <https://www.pcf-p.com/projects/palazzo-lombardia/>)

La arquitecta encargada de la dirección de obra señaló que el problema sería temporal, debido a que se iba a aplicar un tratamiento al vidrio. No se han encontrado más noticias al respecto por lo que es posible que esa solución se llevara a cabo. Sin embargo, esta problemática se podría haber previsto con anterioridad, ya que el

aplicar una solución posterior produce no solo un encarecimiento del proyecto por el propio tratamiento, sino un gasto extra debido a las indemnizaciones a los vecinos afectados para la reparación de las persianas y otros elementos que hayan podido verse afectados.

4.1.2. Procedimiento.

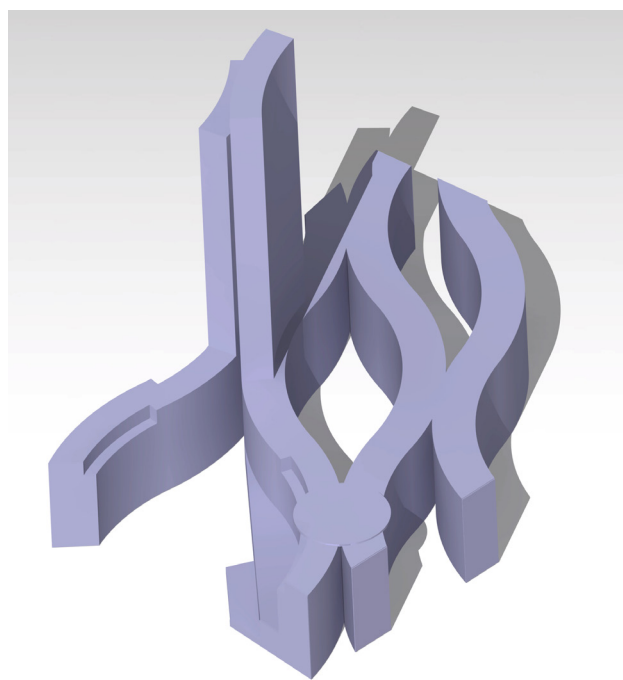
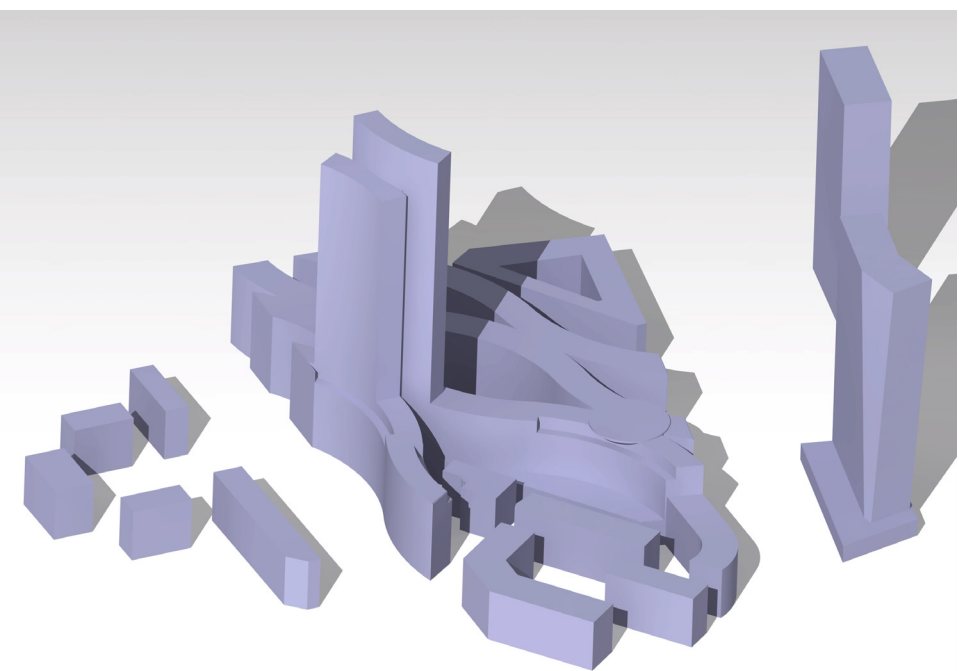
Como hemos estado viendo a lo largo de este documento, para la simulación hemos recurrido al programa Radiance, del que hemos estado hablando con detenimiento en la sección *Radiance* en la página 207. La metodología llevada a cabo en esta investigación podemos dividirla en dos momentos relevantes. Primeramente, se procedió a preparar el modelo y decidir los parámetros a aplicar en dicha simulación. Seguidamente, se procedió a llevar a cabo las simulaciones en un sistema de fases hasta concretar los momentos en donde se producen los picos máximos.

Preparación de la simulación.

Para comenzar con la simulación se procedió al modelado del edificio y su entorno (Fig. 4.4). Durante este modelado se tomó la decisión de prescindir de la cubierta de ETFE que recubre la plaza central del edificio debido a la condición traslúcida de dicha cubierta y la posibilidad de que esta se reemplace o elimine en alguna intervención futura. Además, a nivel técnico, dicha cubierta presentaba una geometría compleja que aumentaría el tiempo de cálculo computacional.

En cuanto a los edificios del entorno, nos dimos cuenta de que desde una perspectiva cenital nos era imposible observar los fenómenos de reflexión que afectaban directamente a las fachadas de los edificios colindantes, que precisamente constituía el objetivo principal de la investigación. Sin embargo, la vista cenital nos permitía obtener más información que otras perspectivas. Por ello, y

Figura 4.4. (Izquierda) Modelo tridimensional empleado en el estudio con el entorno (Elaboración propia, 2022) y (Derecha) Modelo tridimensional empleado en el estudio sin el entorno (Elaboración propia, 2022)



tras comprobar que los edificios colindantes no producían sombras en el Palazzo en las horas críticas, optamos por eliminarlos en la simulación. De esta forma todos los reflejos se concentraban en el suelo y siendo visibles desde la vista cenital. En el caso de aquellos reflejos que inciden en fachadas de edificios colindantes es fácilmente reconocible cuáles son las fachadas afectadas, al incidir el reflejo en la huella de los edificios colindantes.

A pesar de que la vista cenital nos proporcionaba información relevante de la afección en edificios colindantes, las mediciones de la iluminancia en el suelo no se corresponden cuantitativamente con los valores de iluminancia en las fachadas verticales. Por ello, fue necesario recurrir posteriormente a realizar una serie de simulaciones con la volumetría de los edificios colindantes en la que se analizaran las fachadas que pudieran verse afectadas. La perspectiva de dichas simulaciones por tanto se hubo de adecuar a aquella que procurase una buena visualización de dichas fachadas.

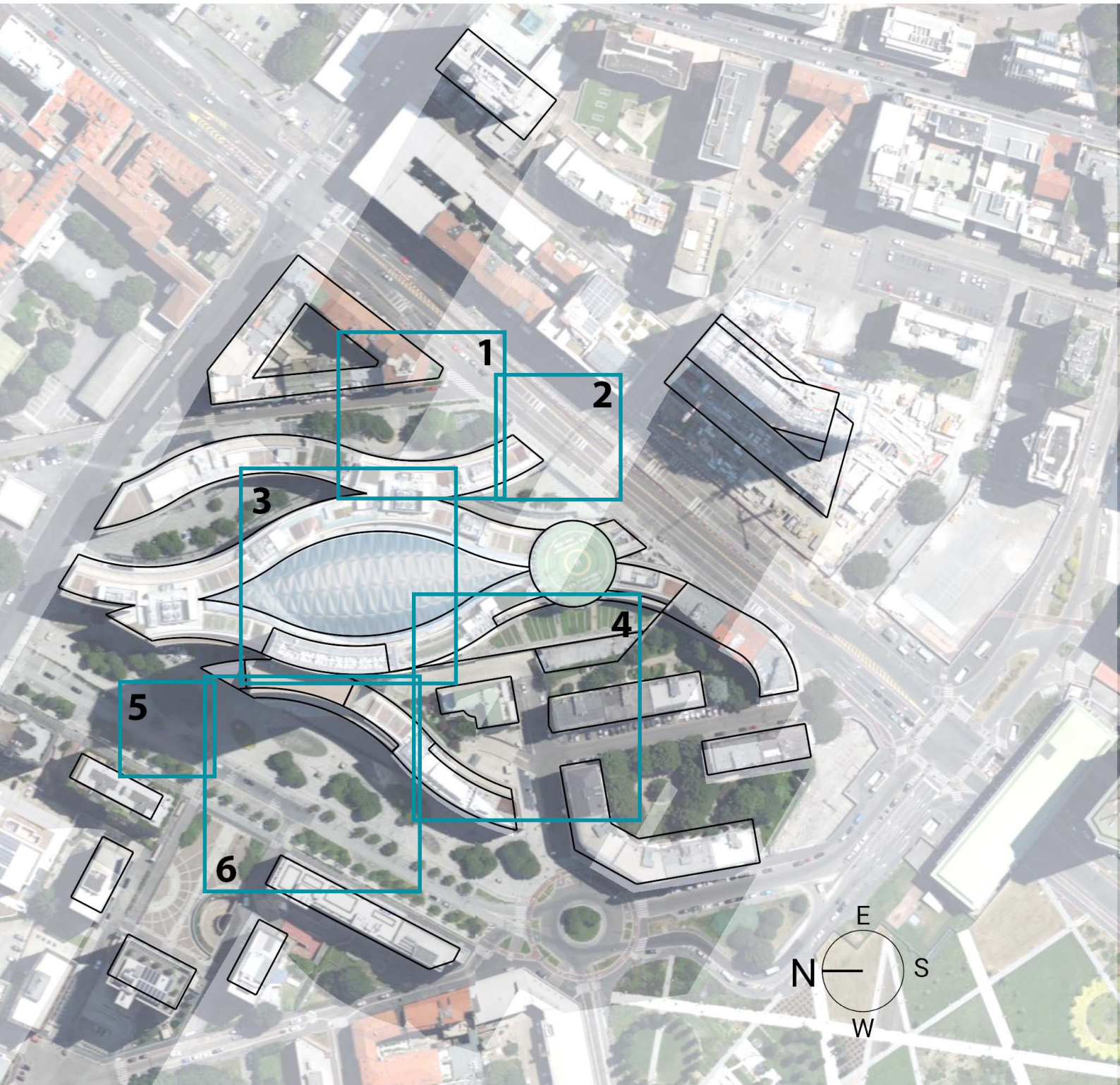
Una vez determinada la geometría, había que determinar las propiedades de los materiales utilizados en la simulación, atendiendo a los datos conocidos del edificio. Respecto a la definición del vidrio, sus características se han extraído de la BS8206-2 GLAZING CALCULATOR FOR RADIANCE (Jaloxa 2014), una calculadora de materiales de glazing para Radiance basada en el British Standard 8206-2:2008. En la documentación acerca del Palazzo no se especifica la reflectividad del material, pero en la guía de productos de la marca responsable de los vidrios (AGC Interpane 2018) aquellos de la misma gama tienen una reflectancia de entre el 8% y el 22%, por lo que se estimó para las simulaciones una reflectancia del 15%. Al material obtenido se le aplicó una reflexión espejada del 15%. Para los materiales correspondientes al suelo y las zonas

ciegas del edificio se ha recurrido a la lista de materiales incluida en Radiance (Ward Larson y Shakespeare 2021, p. 301) dentro de los archivos auxiliares de la suite (*lib/lib/material.rad*), utilizándose *Shiny Black Granite* y *Light Simplon Granite* respectivamente.

Si se observa la fachada del Palazzo Lombardia, podemos comprobar que el cuerpo inferior presenta una celosía que previmos que podría afectar a la reflectividad de dicha zona. Para comprobar el efecto se realizó una simulación disminuyendo la reflectancia del cuerpo inferior al 5%. Los datos arrojaron que la diferencia entre los valores máximos variando la reflectancia de la zona inferior del edificio es despreciable, con una relación de 1,007 de media entre la iluminancia sin variación y con dicha variación. Por esta razón se optó por mantener la misma reflectividad en toda la fachada.

Otro aspecto importante que determinar es el punto de vista desde el que se observaría la simulación. Como se ha comentado previamente, la vista elegida fue una vista con proyección cilíndrica ortogonal al plano del suelo, es decir, una vista cenital (Fig. 4.5), debido a que supone una mayor facilidad para observar todos los efectos en el suelo sin deformaciones producidas por la vista y sin la interferencia en la vista de los cuerpos de los edificios. Sin embargo, las simulaciones llevadas a cabo con el objetivo de determinar la iluminancia en los paños verticales de las fachadas de los edificios residenciales colindantes se desarrollaron desde una vista oblicua.

En cuanto a las magnitudes utilizadas, se han tomado unidades fotométricas (lux) para el estudio, de forma que podamos obtener valores que se pueden utilizar en el cálculo de la incidencia de deslumbramientos a través del CIE Glare Index (CIE-Comission Internationale de l'Eclairage, 2002). Al tener el fenómeno estudiado



1

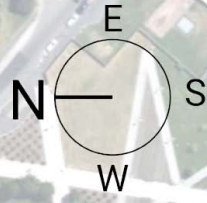
2

3

4

5

6



un significativo componente geométrico, las áreas que presentan un máximo de iluminancia también presentarán el máximo en irradiancia, aunque no se haya cuantificado dicho máximo en este estudio.

No hay un umbral determinado en la literatura científica para estos fenómenos de *rayo de la muerte*. Por ello, los valores que hemos considerado de umbral para determinar la presencia de *rayo de la muerte* es de 1.000.000 lux, lo que supone 8 veces la iluminancia máxima del sol en su zenit en un día despejado, correspondiente a 124.000 lux (Elion y Elion 1979). El mismo manual de Radiance (VVAA 2015) en la herramienta *findglare* comenta que identifica como fuentes de deslumbramientos aquellas direcciones que presenten una iluminancia 7 veces mayor al nivel de luminancia medio, siendo nuestro umbral algo mayor. Este umbral además fue de gran utilidad para el análisis de los resultados obtenidos, debido a que los valores por debajo de 1.000.000 lux se situaban fuera de la cáustica formada por reflexión de la luz en la Palazzo. Por ello, es un valor que permite filtrar los datos de la simulación. En el análisis de datos no se han tenido en cuenta datos por debajo de 100.000 lux.

Finalmente, había que determinar el modelo de distribución de luminancia. Este modelo representa las condiciones meteorológicas en cuanto a cantidad de nubosidad del cielo. Radiance dispone de tres modelos de distribución de luminancia implementados relativos a cielo cubierto (*clear sky*), cielo poco nuboso (*intermediate sky*) y cielo encapotado (*overcast sky*). Se optó por la definición de *clear sky*, correspondiente a un cielo completamente despejado, debido a que nuestro principal objetivo era conocer los valores máximos que se pueden obtener y cualquier otra condición meteorológica será mitigante.

Figura 4.5. Vista cenital empleada para la primera y segunda fases del estudio. Se remarcan las seis áreas donde se detectaron casos de *rayos de la muerte*. (Elaboración propia, 2022; imagen de fondo: <https://zoom.earth/>)

En cuanto al año de estudio para la simulación, se tomó el 2012, al ser este el año del primer decalustro del siglo XXI en donde el solsticio de verano está más cerca de las 00:00 hora local. De esta forma, los datos obtenidos serán relativamente simétricos respecto a dicha fecha. No se tiene en cuenta el cambio de hora de verano, ya que es una cuestión política y no física.

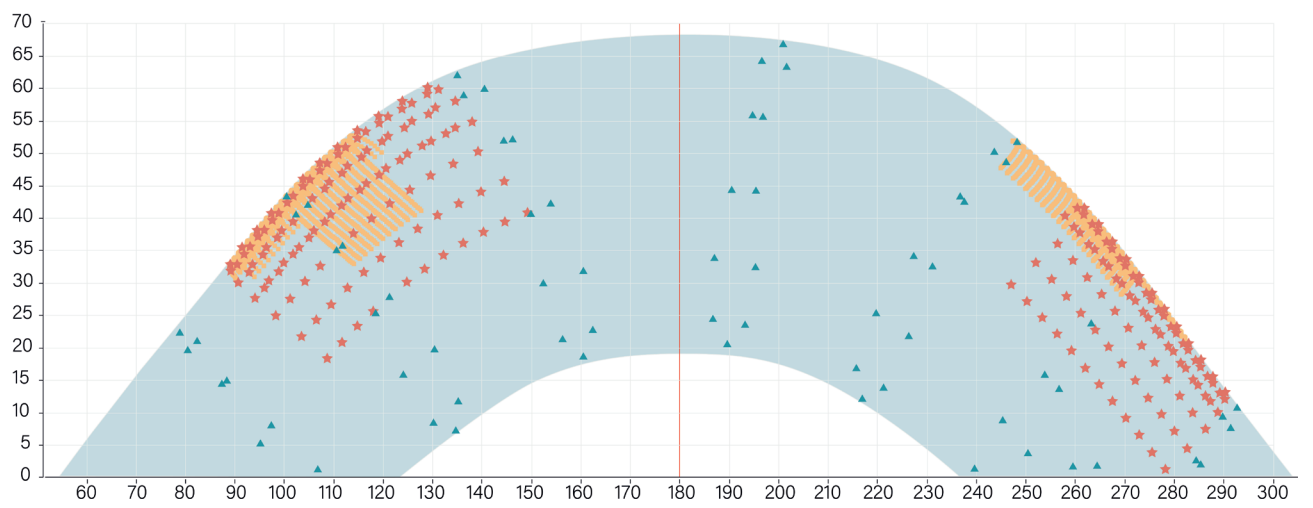
Trabajo por fases.

A la hora de abordar el estudio se recurrió a un sistema de fases de forma deductiva. Es decir, primero comenzamos con un barrido amplio a nivel tanto temporal como geográfico, de forma que se pudieran ir concretando las áreas y momentos donde se concentraran los valores críticos. En fases sucesivas se fueron afinando los intervalos temporales y las áreas geográficas del estudio hasta obtener unos resultados suficientemente detallados sobre el comportamiento lumínico de los reflejos en el Palazzo Lombardia.

En total se realizaron once series de simulaciones (Fig. 4.6) desde una perspectiva cenital, una en la primera fase, dos en la segunda fase y ocho en la tercera fase. En cada fase se fue acotando tanto a nivel geográfico como temporal el rango de las simulaciones. En los casos en los que en esta última fase los resultados mostraron un impacto en la huella de edificios residenciales, se realizó otras series de simulaciones con el modelo de los edificios colindantes en una considerada cuarta fase, de forma que se pudieran analizar los valores reales en las fachadas verticales. El resumen total de todas las simulaciones llevadas a cabo se puede apreciar en la tabla 4.1.

Los factores que se utilizaron para determinar el número de casos estudiados en cada fase dependieron pues de los datos obtenidos

Figura 4.6. Casos estudiados atendiendo al azimut (eje x) y la elevación (eje y). Los casos correspondientes a la Fase 1 se representan mediante triángulos azules, los correspondientes a la Fase 2 se representan con estrellas naranjas y los de la Fase 3 con cuadrados amarillos. *(Elaboración propia, 2022)*



Fase	Casos	Intervalo temporal	Intervalo horario	Número de simulaciones
1	-	Todos los días 21 de cada mes	7:00-19:00 en intervalos de 2 horas	84
2	Mañana	Todos los días 6 y 21 de cada mes entre mayo y septiembre	8:00-11:45 en intervalos de 15 minutos	120
	Tarde	Todos los días 6 y 21 de cada mes entre abril y julio	16:00-18:45 en intervalos de 15 minutos	96
3	1M	15/05-15/07 en intervalos de 3 días	8:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	523
	2M	15/06-15/07 en intervalos de 1 día	9:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	372
	3M	15/06-15/07 en intervalos de 1 día	8:00-8:55 en intervalos de 5 minutos	372
	4M	15/07-31/08 en intervalos de 1 día	9:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	576
	2T	15/06-30/06 en intervalos de 1 día	15:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	384
	4T	15/05-15/07 en intervalos de 1 día	16:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	744
	5T	15/05-15/06 en intervalos de 1 día	15:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	768
	6T	15/06-30/06 en intervalos de 1 día	16:00-17:55 en intervalos de 5 minutos	384
4	1M	8/06-23/06 en intervalos de 1 día	8:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	384
	4M	1/08-31/08 en intervalos de 1 día	9:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	372
	4T	1/06-30/06 en intervalos de 1 día	16:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	360

en la fase previa. Una cantidad excesiva de datos generados podía ocasionar problemas de computación y almacenamiento por lo que este también fue un factor que se tuvo presente a la hora de determinar el número de casos estudiados, hasta un máximo de unas 750 simulaciones por cada fase y área geográfica.

Fase 1.

En esta primera fase recurrimos a un barrido a lo largo de todo el año, realizando simulaciones el 21 de cada mes, por ser este el día correspondiente con el solsticio de invierno y el de verano. El rango horario estudiado fue desde las 7:00 hasta las 19:00 en intervalos de 2 horas. De esta forma obtuvimos un primer barrido de un total de 84 simulaciones.

Los resultados obtenidos en esta primera fase arrojaron un claro aumento de la iluminancia reflejada a las 9:00 y a las 17:00, determinando así dos intervalos horarios para estudiar en la siguiente fase, correspondiente con los horarios de 8:00-10:00 y de 16:00-18:00. Este comportamiento se puede explicar con la morfología del edificio, ya que las fachadas curvas, que son las fachadas que concentran los rayos solares, se encuentran orientadas hacia el este y el oeste. Por tanto, en las horas centrales del día estas fachadas no se ven afectadas.

Viendo una clara diferencia entre las simulaciones en horario de mañana (7:00-11:00) y tarde (13:00-19:00) procedimos a analizarlos de forma separada. El resultado obtenido es que en el horario de mañana se concentraba la mayor iluminancia en los meses de mayo y septiembre, con valores también muy altos en junio y julio; mientras que en el horario vespertino los picos se producían en los meses de mayo y junio.

Tabla 4.1. Resumen de las fases que componen este estudio y los intervalos temporales estudiados en cada fase de la investigación (Elaboración propia, 2022)

Para la siguiente fase se decidió estudiar los meses de mayo a septiembre en horario matutino, ya que los picos se producen en meses algo alejados en el tiempo, y de abril a julio en horario vespertino, debido a que al concentrarse los picos en dos meses consecutivos podemos ampliar la muestra a los meses colindantes.

Fase 2.

En una segunda fase procedimos a llevar a cabo dos series de simulaciones, distinguiendo aquellas correspondientes con la mañana y aquellas correspondientes con la tarde. Durante las horas de la mañana se veían afectadas a las zonas geográficas relativas al este del Palazzo y por la tarde las del oeste, por lo que convenimos su denominación como este y oeste respectivamente.

En la zona este, correspondiente al horario matutino, estudiamos los días 6 y 21 de los meses de mayo a septiembre en horario de 8:00 a 10:45 en intervalos de 15 minutos. Lo primero que pudimos identificar es que había cuatro áreas geográficas diferenciadas donde se obtenían unos valores de iluminancia altos, superando en algunos casos los 10^6 lux. También aparece una quinta zona que no alcanza dichos valores y por tanto se ha obviado para la siguiente fase del estudio.

En la zona oeste, el intervalo temporal estudiado se corresponde con los días 6 y 21 de entre los meses de abril y julio en horario de 16:00 a 18:45 en intervalos de 15 minutos. En este caso encontramos cuatro áreas geográficas diferenciadas, obteniendo en tres de ellas valores por encima de 10^6 lux. Dos de estas zonas coinciden geográficamente con dos de las áreas identificadas en el horario matutino y precisamente una de ellas es donde se sitúan los edificios que indicaron problemas de reflejos se encuentra en una de dichas zonas.

Fase 3.

En esta tercera fase se realizó un estudio detallado de seis áreas geográficas en distintos intervalos temporales, correspondiendo a un total de ocho casos de estudio. De estos casos de estudio, cuatro se concentraban en la zona este por la mañana y los otros cuatro en la zona oeste.

Estos intervalos se obtuvieron a partir de los resultados de la segunda fase y evitando superar las 750 simulaciones por caso, aunque en el caso 5T sí llegaron a superarse. La nomenclatura utilizada para cada área se define por dos caracteres. El primero de ellos indica la zona geográfica definida anteriormente y el segundo se corresponde con M o T según el intervalo horario estudiado, correspondiendo al intervalo matutino y vespertino respectivamente. Como se ha comentado en la fase dos, hay dos áreas geográficas con incidencia en ambos intervalos horarios.

Los resultados obtenidos se consideraron definitivos en cinco casos, mientras que en tres de ellos la incidencia del pico de iluminancia se producía sobre la huella de algún edificio colindante, lo que no nos aseguraba que dichos resultados fueran reales. En estos últimos tres casos se procedió a la simulación de dichas zonas en una cuarta fase.

Fase 4.

Finalmente en la cuarta fase se analizó los valores de iluminancia en las fachadas verticales de los edificios residenciales que podrían verse afectados por los reflejos.

Esta fase es la única en la que se realizaron las simulaciones con el modelo tridimensional que incluía la volumetría de los edificios colindantes, así como también la única en la que la perspectiva no es cenital sino que se orientó en una dirección que permitiera observar los efectos en las fachadas estudiadas.

4.1.3. Resultados.

Zona este.

En la segunda fase del estudio pudimos determinar 4 áreas geográficas (Fig. 4.7) que se veían afectadas en el horario matinal y por tanto la luz solar incidía en las fachadas este del Palazzo Lombardia. En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de los datos obtenidos en las simulaciones, donde se reflejan los valores máximos obtenidos en cada zona estudiada y el intervalo temporal estudiado.

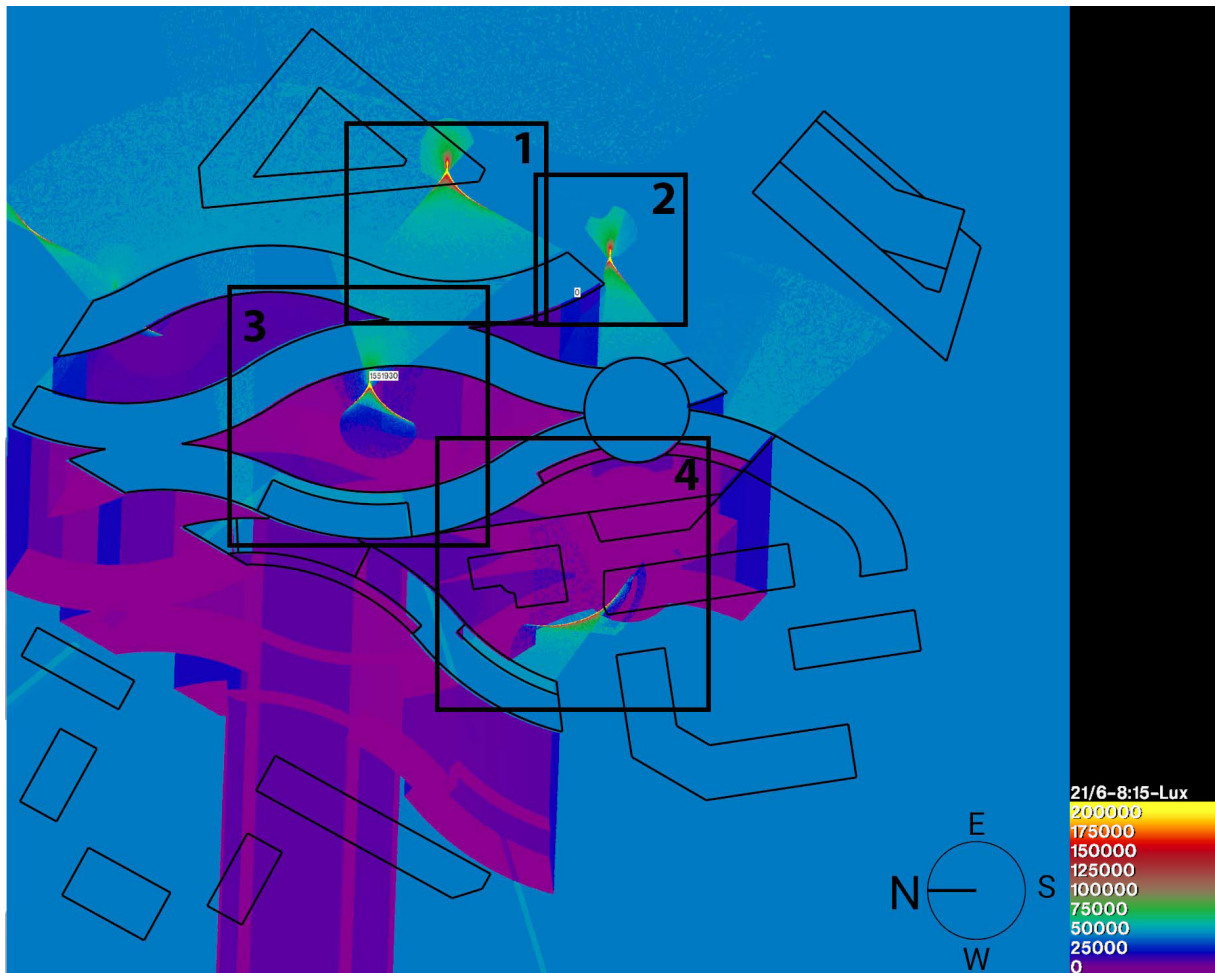
En dos de las zonas (1M y 4M) se tuvo que recurrir al análisis de la iluminancia en la fachada vertical mientras que en las otras dos zonas estudiadas los valores obtenidos son los propios del plano del suelo.

Dentro de los parámetros de interés, se analizaron los momentos de máximo de iluminancia en cada uno de los casos. Una cuestión interesante que se explica por la propia geometría del Palazzo es que en las tres primeras áreas geográficas el pico se establece en el mes de junio, resultado esperable al situarse en dicho mes el solsticio de verano, pero en el área 4 dicho pico se produce en el mes de agosto.

Finalmente, otro parámetro de interés para el estudio es el análisis del área concreta donde inciden los rayos reflejados, de forma que se puedan valorar las posibilidades de afectación. En este caso, en las áreas 1 y 4 la incidencia se producía sobre fachadas de edificios residenciales, en el área 2 sobre la vía pública y finalmente en el área 3 sobre la cubierta del propio Palazzo.

Figura 4.7. Detalle de las áreas afectadas por las reflexiones solares en las fachadas este. La imagen de fondo se corresponde con el 21 de junio a las 8:15. (Elaboración propia, 2022)

Tabla 4.2. Tabla resumen correspondiente a los casos de estudio afectados en las fachadas este (Elaboración propia, 2022)



Zona	1M	2M	3M	4M
Intervalo temporal estudiado	15/05 – 15/07 en intervalos de 3 días	15/06 – 15/07 en intervalos de 1 día	15/06 - 15/07 en intervalos de 1 día	15/07 – 31/08 en intervalos de 1 día
Intervalo horario estudiado	8:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	8:00-8:55 en intervalos de 5 minutos	9:00-9:55 en intervalos de 5 minutos	9:00-9:55 en intervalos de 5 minutos
Flujo máximo recibido (lux) en el plano horizontal	-	1.790.000	2.416.500	1.355.030
Flujo máximo recibido (lux) en el plano vertical	614.328	-	-	-
Día flujo máximo	9-jun	18-jun	19-jun	4-ago
Hora del flujo máximo	8:15	8:15	9:30	9:30
Zenit en el momento del flujo máximo	35,6	48,5	35,6	43,2
Azimut en el momento del flujo máximo	92,5	107,1	91,8	112,4
Localización del flujo máximo	Edificio en Francesco Algarotti	Vía pública Melchiorre Gioia	Cubierta de EFTE	Edificio en Ettore Bellani 3

Zona 1.

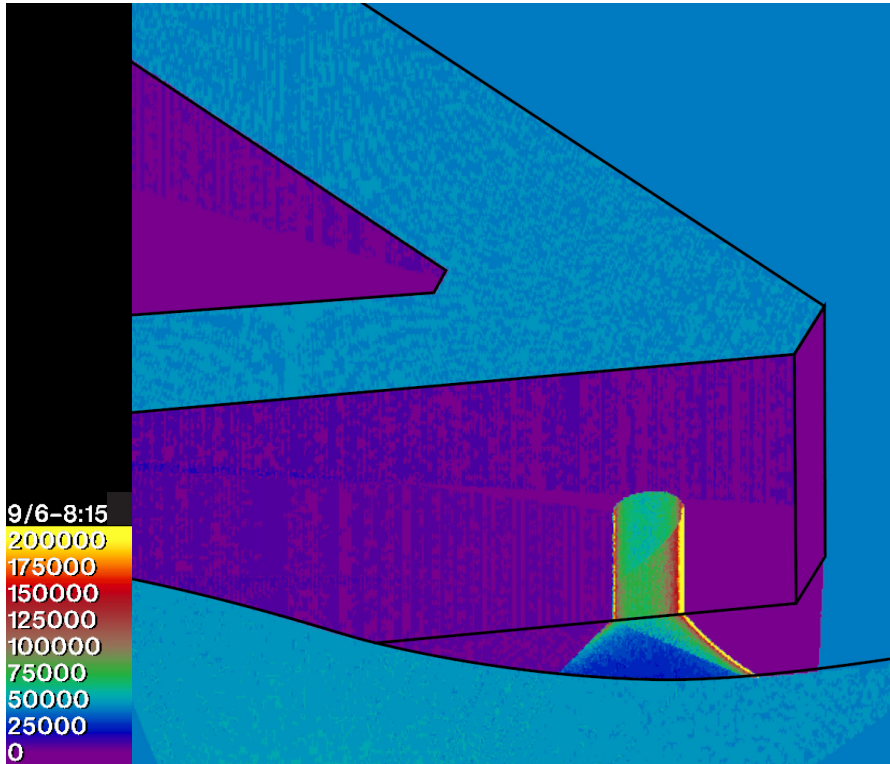
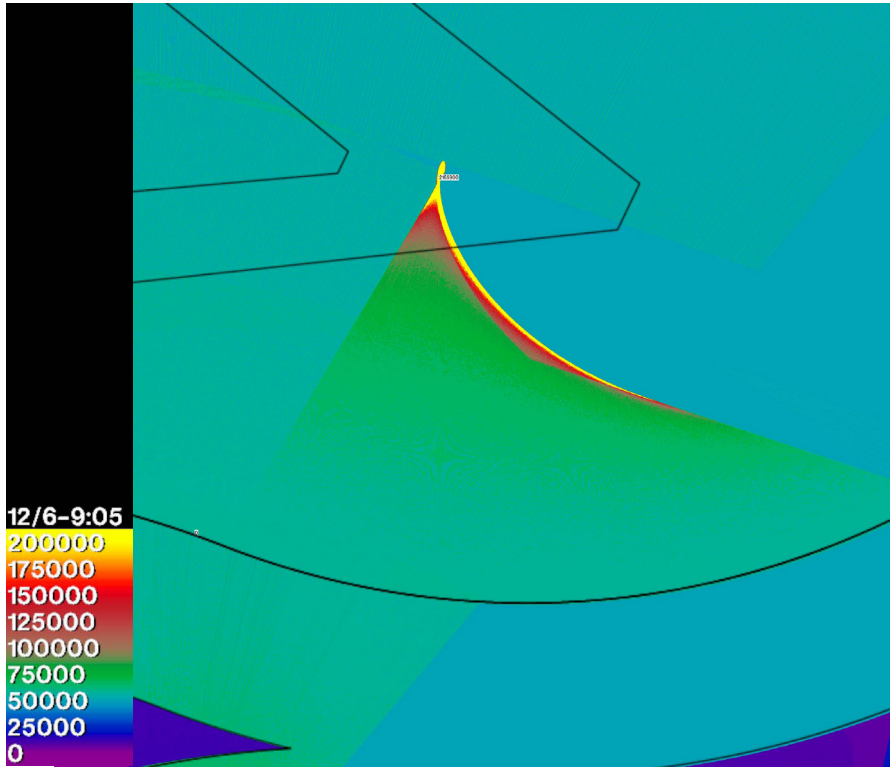
Esta zona se ve fundamentalmente afectada por la reflexión de la fachada más oriental del cuerpo bajo del Palazzo, en la via Francesco Algarotti. La incidencia de los rayos reflejados se produce sobre la fachada del edificio de enfrente. Esta incidencia se produce desde la salida de sol hasta alrededor de las 9:30 hora local.

El análisis sobre el plano del suelo reflejó un pico máximo de incidencia de 2.165.900 lux que se producía a las 9:05 entre los días 9 y 15 de junio (Fig. 4.8). Este pico se situaba sobre la huella del edificio de enfrente, formando claramente una cáustica en forma de limaçon. Estos valores obtenidos eran especialmente altos, lo que nos llevó deducir que se debía producir un *rayo de la muerte* afectando a la fachada del edificio residencial.

Para analizar realmente la afección sobre la fachada del edificio se procedió a la simulación sobre dicha fachada. A pesar de las primeras deducciones, tras examinar los resultados de esta simulación se pudo apreciar que no se produce el fenómeno de *rayo de la muerte* debido a que los rayos lumínicos inciden sobre la fachada antes de que ocurra la concentración. Debido a esto, el pico máximo de iluminancia en la fachada se reduce hasta los 614.328 lux para el 9 de junio a las 8:15 (Fig 4.8).

Por tanto, podemos concluir que no se produce el fenómeno de *rayo de la muerte* sobre la fachada del edificio de la via Francesco Algarotti a pesar de lo que reflejaban los resultados preliminares.

Figura 4.8. Incidencia de los rayos solares en la zona 1. Las imágenes muestran el momento de máxima iluminancia obtenidos en el estudio sin los edificios del entorno (Arriba) el 12 de junio a las 9:05 y en el estudio con los edificios del entorno (Abajo) el 9 de junio a las 8:15 (Elaboración propia, 2022)



Zona 2.

El área 2 no afecta directamente a ninguna edificación cercana sino a la vía pública de Melchiorre Gioia. Aun así, esta vía posee varios carriles de circulación, aparcamiento y acera de peatones, habiéndose observado incidencia en estos tres lugares.

La incidencia sobre la zona de aparcamientos podría causar daños similares a los que se observaron en el incidente del 20 de Fenchurch Street en Londres (Zhu, Jahn, y Rein 2019), igual que se podrían observar otro tipo de afectaciones en los tres lugares. El valor máximo observado se sitúa en los 1.790.000 lux para el 18 de junio a las 8:15 (Fig. 4.9).

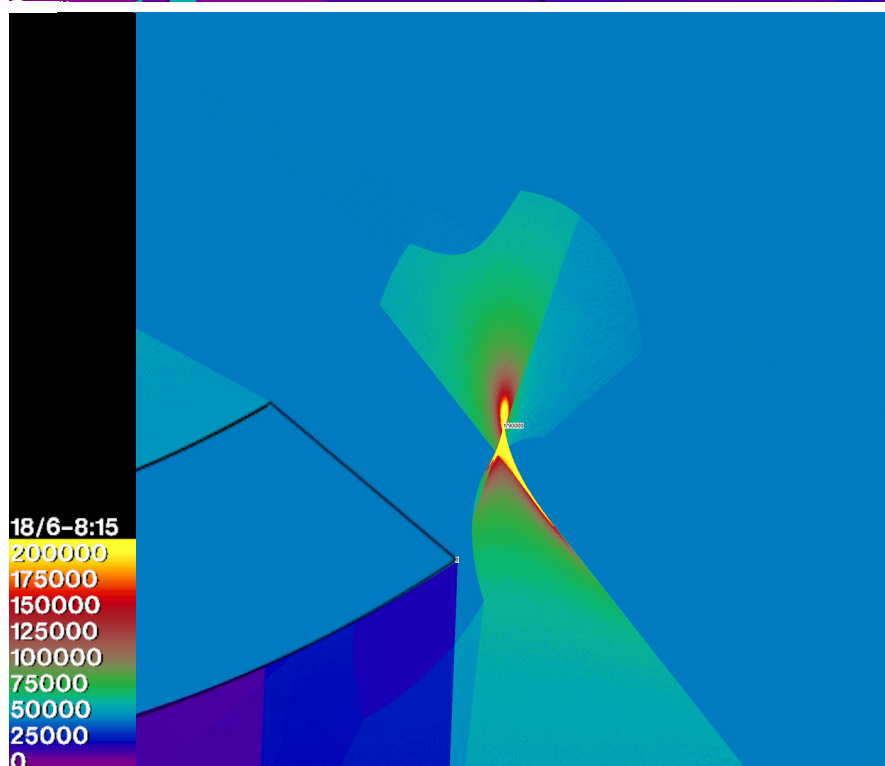
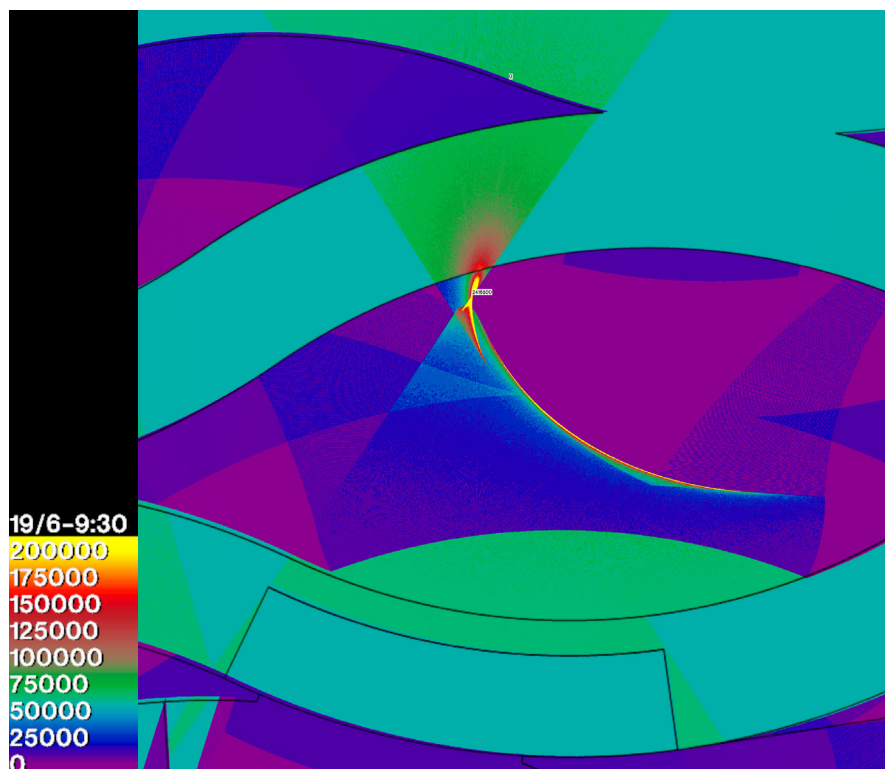
A pesar de los resultados obtenidos, no se tiene conocimiento de que se hayan registrado problemas causados por *rayos de la muerte* en este área.

Zona 3.

La zona 3 se corresponde con la plaza del Palazzo. Esta zona recibe los reflejos directamente desde la torre del Palazzo, viéndose afectadas la cubierta de ETFE y la cubierta del cuerpo bajo. Aunque el nivel de desconfort que se puede producir por estos reflejos es limitado, ya que no afecta directamente a carpinterías sino a las propias cubiertas, sí que puede producir daños en el ETFE, afectando a su vida útil. Sin embargo, la posición de incidencia de estos reflejos sobre la cubierta del cuerpo bajo puede suponer una oportunidad para situar paneles fotovoltaicos o colectores solares que aprovechen la energía que se acumula por reflexión.

Los valores de iluminancia incidentes en este área son muy altos, superando los 2.000.000 lux. Precisamente el flujo máximo recibido se sitúa en los 2.416.500 lux, produciéndose el 19 de junio a las 9:30 (Fig. 4.9).

Figura 4.9. Casos estudiados cuando la radiación solar incide en las fachadas este del edificio. Las imágenes muestran el momento en el que aparece el valor máximo en cada área: (Arriba) el 19 de junio a las 9:30 en la zona 2 y (Abajo) 18 de junio a las 8:15 en la zona 3 (Elaboración propia, 2022)



Zona 4.

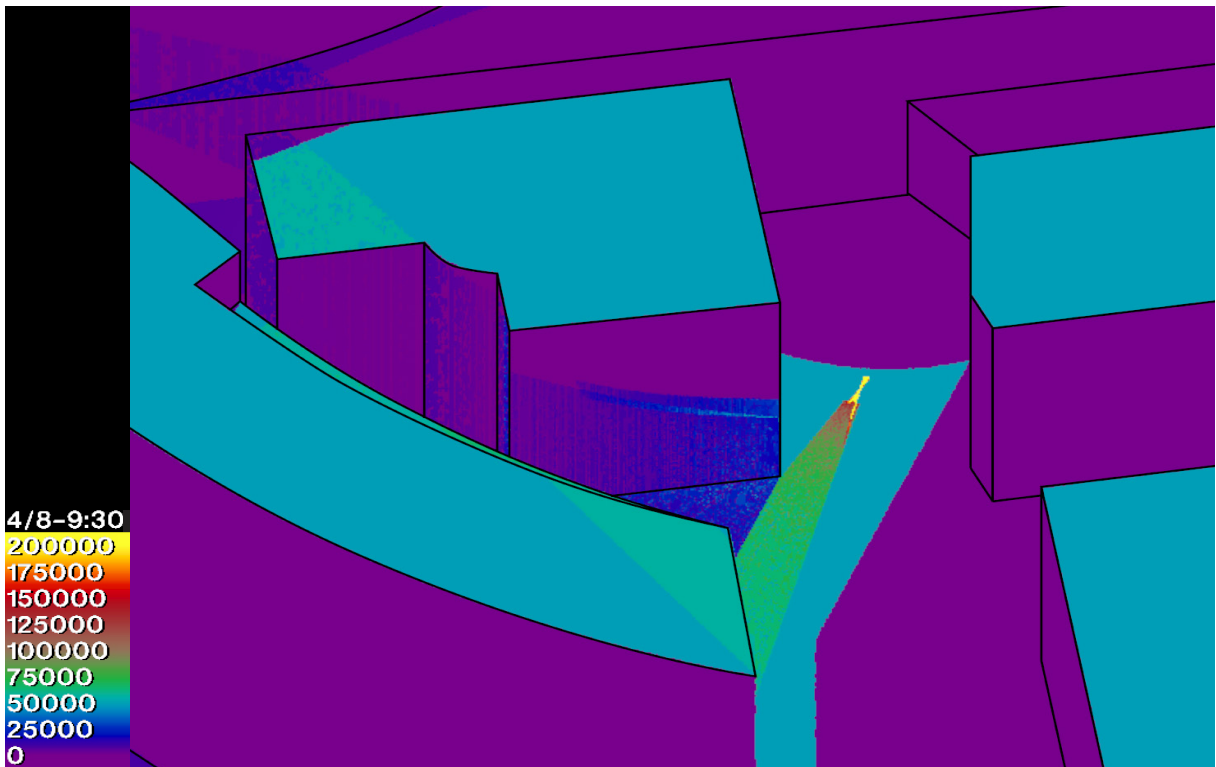
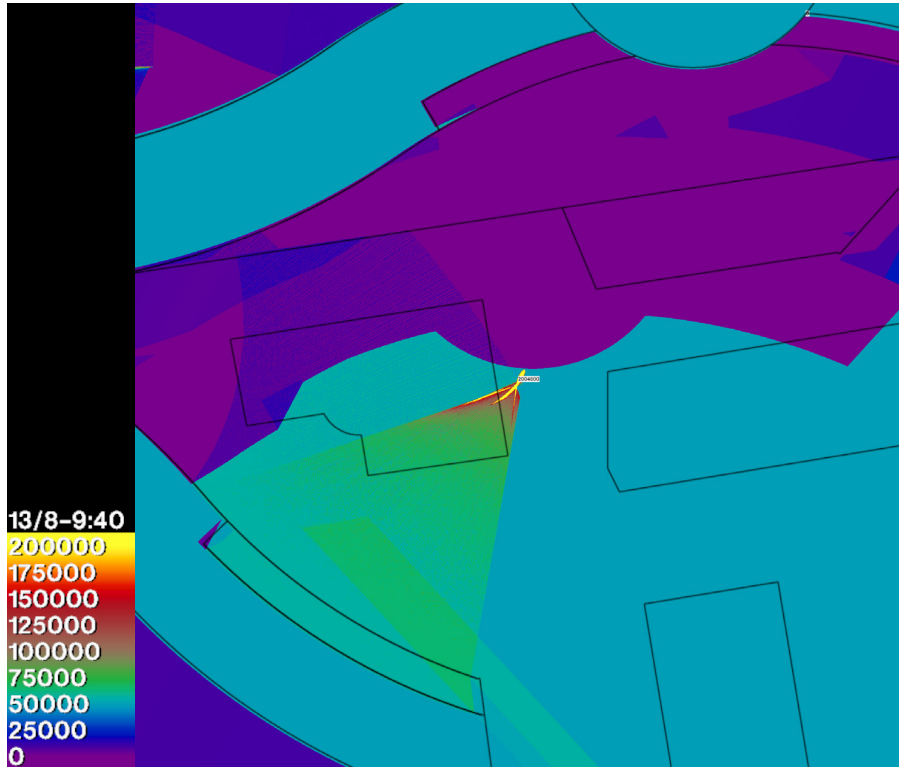
Finalmente, en el horario matutino, analizamos la zona correspondiente al área residencial que se sitúa en la zona suroeste del Palazzo. Al igual que en el caso de la zona 1, el máximo de iluminancia analizada en el plano del suelo se situó sobre la huella de los edificios residenciales de la zona. Concretamente, se apreciaba afección en las fachadas norte y oeste de los edificios de via Alessandro Paoli 8 y Ettore Bellani 3. Por ello se procedió a hacer la simulación en las fachadas verticales de dichos edificios.

La mayor afección en el suelo se producía en el edificio de Ettore Bellani 3, donde la incidencia en la fachada oeste se concentraba desde mediados del mes de julio y durante el mes de agosto con su máximo en 2.004.800 lux el 13 de agosto a las 9:40 (Fig. 4.10).

Sin embargo, tras analizar los valores de la simulación en la fachada vertical, se encontró que no solo no se veía seriamente afectado el edificio de Ettore Bellani, sino que este edificio actuaba con un efecto pantalla que evitaba la concentración de los rayos solares sobre la superficie de la propia calle. Los resultados obtenidos en las simulaciones con los edificios colindantes al Palazzo Lombardia reflejan un pico de 1.355.030 lux para el 4 de agosto a las 9:30, afectando precisamente no a la fachada vertical sino al plano horizontal de la calle (Fig. 4.10).

Precisamente, este caso difiere de los anteriores en que el pico máximo de iluminancia se registra en el mes de agosto, desviado respecto del solsticio de verano. La explicación de este fenómeno se podría determinar según la forma propia del edificio, ya que justo el ala donde refleja la luz solar se encuentra cortado por lo que en los días en los que el azimut es más extremo respecto al sur, los rayos solares reflejan con un ángulo mayor respecto a la normal.

Figura 4.10. Incidencia de los rayos solares en la zona 4 en horario de mañana. Las imágenes muestran el momento de máxima iluminancia obtenidos en el estudio sin los edificios del entorno (Arriba) el 13 de agosto a las 9:40 y en el estudio con los edificios del entorno (Abajo) el 4 de agosto a las 9:30 (Elaboración propia, 2022)



Zona oeste.

Por otro lado se estudiaron las cuatro zonas que habíamos determinado como afectadas en horario vespertino en la fase anterior debido a la reflexión en las fachadas oeste del Palazzo (Fig. 4.11). En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los datos obtenidos en las simulaciones, donde se reflejan los valores máximos obtenidos en cada zona estudiada y el intervalo temporal estudiado.

En una de las cuatro zonas que se estudiaron, la denominada 4T, fue necesario realizar la simulación con la modelización de los edificios colindantes para comprobar los valores de iluminancia en la fachada vertical.

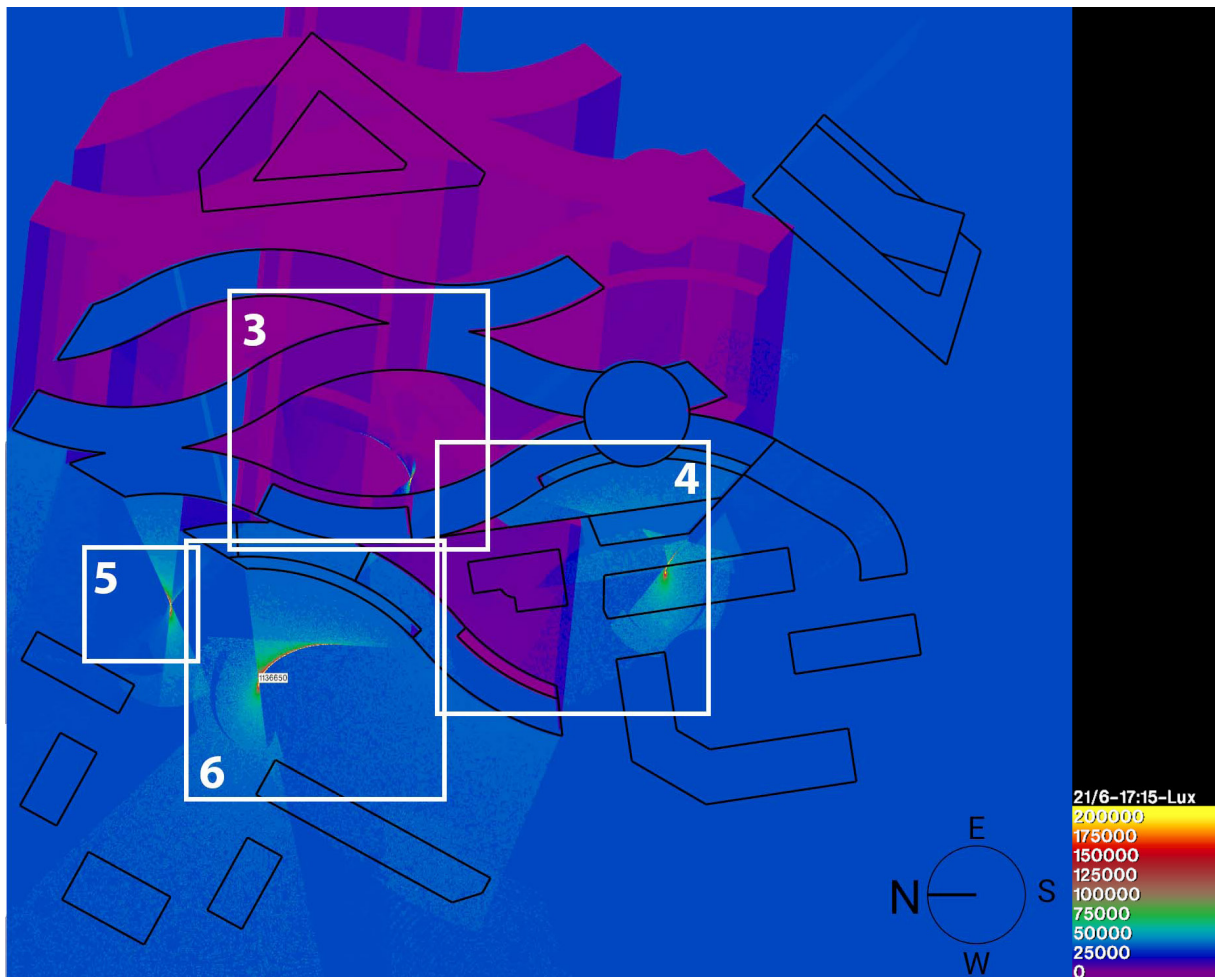
Todos los casos estudiados en la zona oeste presentaban los picos de iluminancia se producen en el mes de junio, coincidiendo con el solsticio de verano. Además en tres de las zonas estudiadas, los valores superan el millón de lux.

Dos de las cuatro zonas estudiadas en horario vespertino también se ven afectadas en horario matutino, aunque el área afectada varía entre la mañana y la tarde. Estas dos zonas se corresponden con las zonas 3 y 4.

En estos casos en las zonas 5 y 6 se ve afectada la vía pública, el área 3 el propio Palazzo y finalmente en el área 4 se ve afectado el edificio de via Alessandro Paoli donde denunciaron los vecinos el incidente con las persianas.

Figura 4.11. Detalle de las áreas afectadas por las reflexiones solares en las fachadas oeste. La imagen de fondo se corresponde con el 21 de junio a las 17:15 (Elaboración propia, 2022)

Tabla 4.3. Tabla resumen correspondiente a los casos de estudio afectados en las fachadas oeste (Elaboración propia, 2022)



Zona	3T	4T	5T	6T
Intervalo temporal estudiado	15/06 – 30/06 en intervalos de 1 día	15/05 – 15/07 en intervalos de 1 día	15/05 – 15/06 en intervalos de 1 día	15/06 – 30/06 en intervalos de 1 día
Intervalo horario estudiado	15:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	16:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	15:00-16:55 en intervalos de 5 minutos	16:00-17:55 en intervalos de 5 minutos
Flujo máximo recibido (lux) en el plano horizontal	930.800	-	1.609.210	1.371.140
Flujo máximo recibido (lux) en el plano vertical	-	1.689.760	-	-
Día flujo máximo	24-jun	1-jun	10-jun	19-jun
Hora del flujo máximo	15:50	16:10	16:35	17:20
Zenit en el momento del flujo máximo	43,4	38,4	34,9	27,6
Azimut en el momento del flujo máximo	259,4	263,2	268,4	276,3
Localización del flujo máximo	Patio del Palazzo Lombardia	Edificio en Alessandro Paoli	Vía pública Francesco Restelli	Vía pública Francesco Restelli

Zona 3.

Podríamos indicar esta zona como la menos relevante en cuanto a afección de *rayo de la muerte* por dos razones. Primeramente, los valores obtenidos son de un flujo máximo en el plano horizontal de 930.800 lux el 24 de junio a las 15:50 (Fig. 4.10), siendo este un valor alto pero bastante inferior a los registrados en las otras áreas estudiadas.

Además, esta zona coincide con el patio del propio Palazzo pero, a diferencia de la misma zona en horario matutino, en esta ocasión la reflexión no se produce en la torre sino en el cuerpo bajo del edificio, que actualmente se encuentra cubierto por la cúpula de ETFE. Si tuviéramos en cuenta la construcción en el estado actual, la cubierta absorbería gran parte de los rayos solares y por tanto no incidirían en la fachada, impidiendo así la reflexión de los mismos.

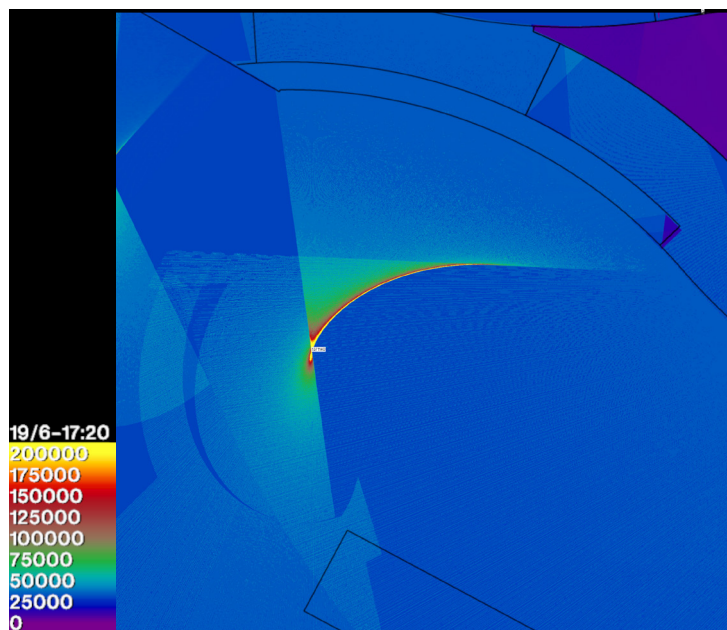
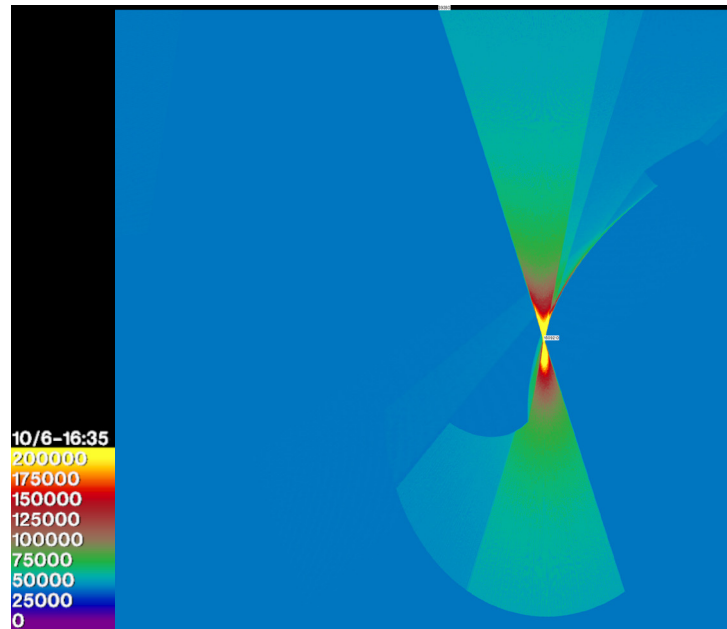
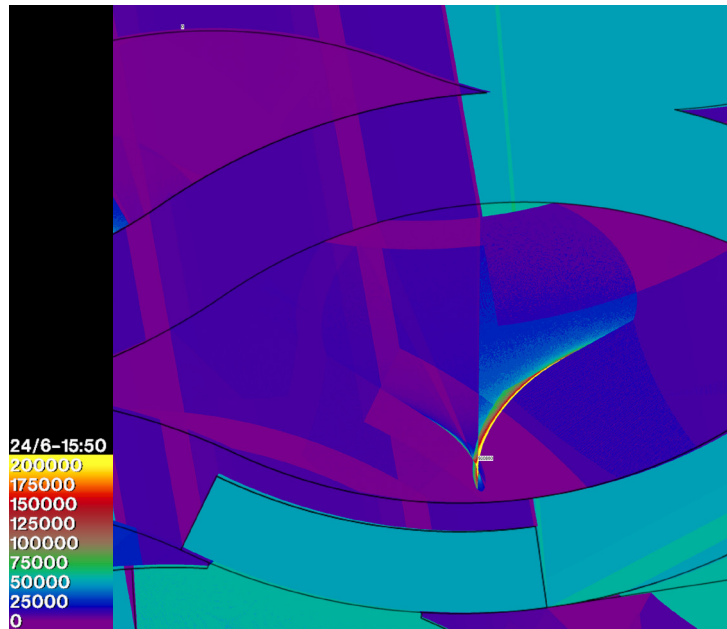
Por tanto, la simulación no recrea el estado actual del edificio aunque mantiene su interés al estudiar qué ocurriría si eventualmente se descubriese la plaza interior del Palazzo.

Zonas 5 y 6.

Finalmente, hemos agrupado las zonas 5 y 6 al afectar a la misma área correspondiente a la vía Francesco Restelli. En estas dos zonas se observaron valores máximos en el plano del suelo de 1.609.210 lux y 1.371.140 lux respectivamente. El valor pico se produce en la zona 5 el día 10 de junio a las 16:35 (Fig. 4.10) y mientras que en la zona 6 es el día 19 de junio las 17:20 (Fig. 4.10).

La afectación geográfica en estas zonas se produce sobre la vía pública de Francesco Restelli, pudiendo afectar a vehículos y viandantes que circulen, así como a los vehículos estacionados en dicha vía. Esta zona también presenta frente al edificio una zona ajardinada que pudiera verse afectada por el exceso de incidencia de luz solar reflejada, haciendo disminuir la vegetación.

Figura 4.12. Casos estudiados cuando la radiación solar incide en las fachadas este del edificio. Las imágenes muestran el momento en el que aparece el valor máximo en cada área:
(Arriba) 24 de junio a las 15:50 en la zona 2,
(Medio) 10 de junio a las 16:35 en la zona 5
y
(Abajo) 19 de junio a las 17:20 en la zona 6
(Elaboración propia, 2022)



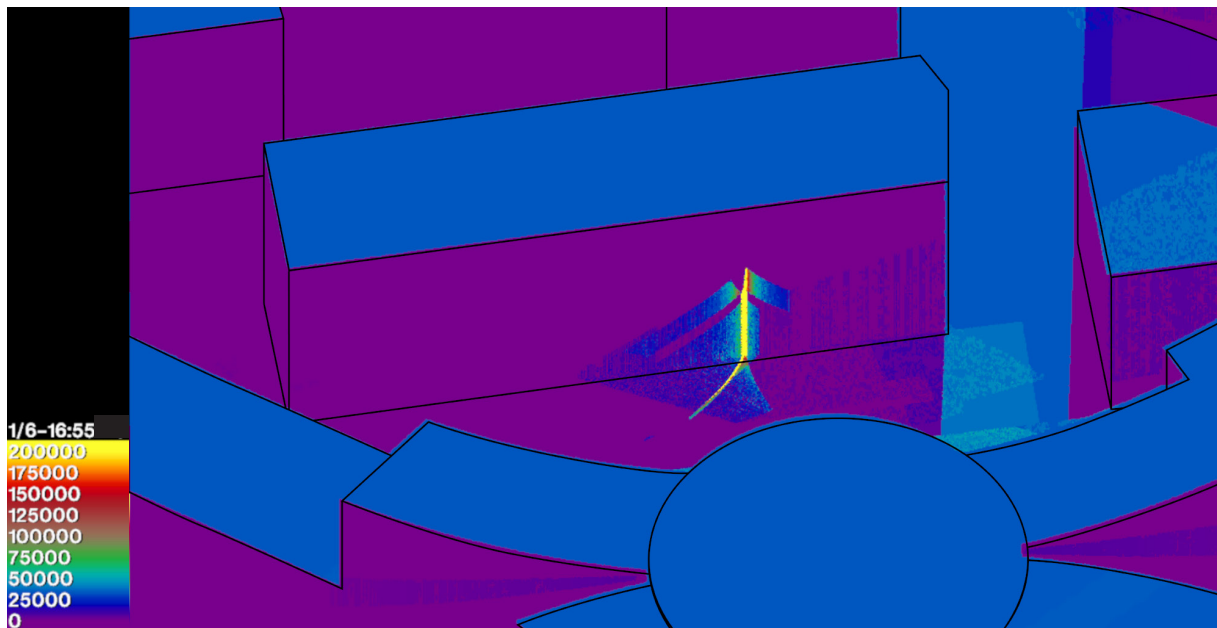
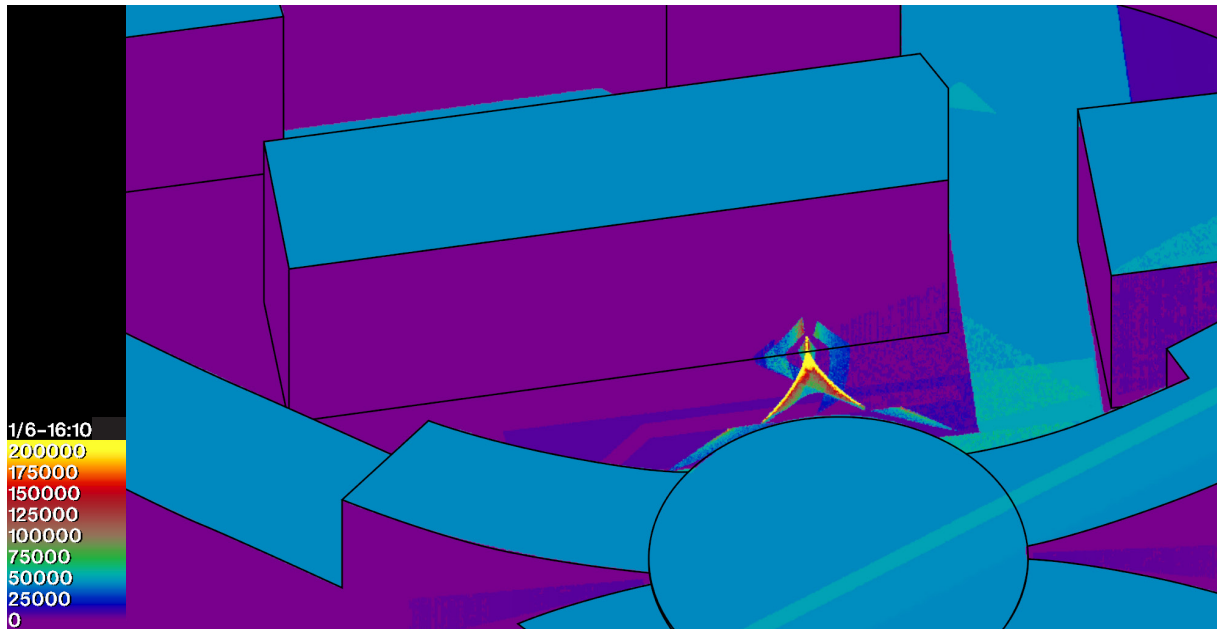
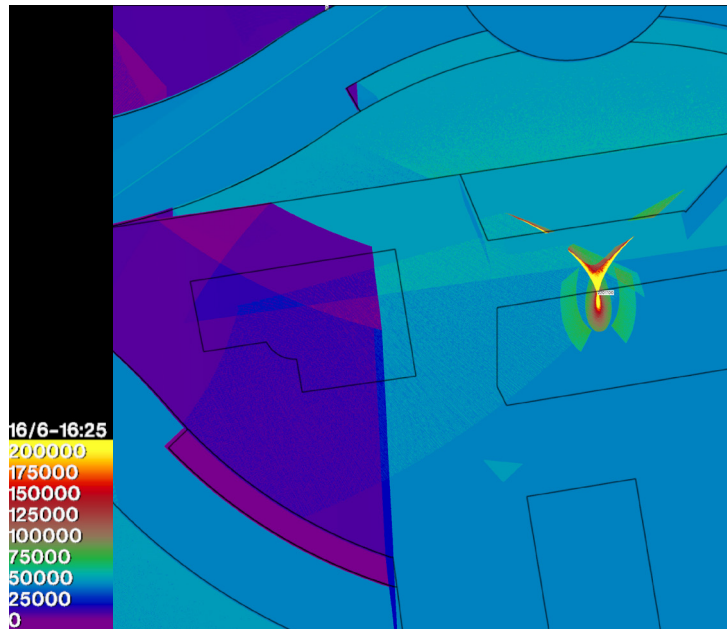
Zona 4.

En cambio, esta zona representa un gran interés para el estudio puesto que es la zona donde se sitúan los hechos denunciados por los vecinos. Concretamente se ven afectados de manera importante las fachadas este de los edificios de Alessandro Paoli. En la fase 3 del estudio se pudo apreciar una importante afección sobre la huella del edificio de Alessandro Paoli, en la que el pico máximo de iluminancia en el plano horizontal alcanzaba una cifra de 2.201.700 lux el día 16 de junio a las 16:25 (Fig. 4.13).

Debido a esto, esta zona también se estudió en la cuarta fase con la volumetría de los edificios colindantes para analizar la afección real en la fachada vertical. Este estudio mostró que el pico de iluminancia que se proyectaba sobre la fachada del edificio de Alessandro Paoli era de 1.689.760 lux para el día 1 de junio a las 16:10 (Fig. 4.13). Al analizar los resultados a lo largo de la tarde, se pudo apreciar cómo a pesar de que en el momento de mayor concentración de iluminancia el área afectada en la fachada es relativamente pequeña, a medida que avanza la tarde dicho área va aumentando (Fig. 4.13), reduciéndose la iluminancia concentrada pero alcanzando valores igualmente altos que pueden considerarse *rayos de la muerte*.

Todos estos datos corroboran los hechos descritos por los vecinos, siendo perfectamente compatibles los daños descritos con los datos obtenidos.

Figura 4.13. Incidencia de los rayos solares en la zona 4 en horario de tarde. Las imágenes muestran (Arriba) el momento de máxima iluminancia obtenido en el estudio sin los edificios del entorno el 16 de junio a las 16:25, y en el estudio con los edificios del entorno (Medio) el momento de máxima iluminancia el 1 de junio a las 16:10 y (Abajo) la afección a mayor área de la fachada el 1 de junio a las 16:55 (Elaboración propia, 2022)



4.1.4. Conclusiones acerca del caso de estudio.

El objetivo principal del estudio de este caso era el de analizar el fenómeno de reflexión en el Palazzo Lombardia y simular los problemas de *rayos de la muerte* reportados por los vecinos de los edificios colindantes. Así, se han podido determinar seis zonas geográficas y ocho momentos temporales en los que se pueden producir fenómenos de concentración de rayos solares, causando incidentes de distinta gravedad. Gracias al uso de la herramienta Radiance, ya validada previamente en este trabajo para este tipo de simulaciones, se han podido determinar los picos de iluminancia que afectan a los edificios colindantes, así como a las vías urbanas que rodean el edificio.

Para producir un ahorro en el número de simulaciones y una mejora del método se realizaron los análisis previos desde una vista cenital sin los edificios colindantes para posteriormente centrarnos únicamente en los casos en los que se detectó la posibilidad de afección a edificios vecinos. De esta forma evitamos la realización de varias simulaciones desde distintas perspectivas para comprender el fenómeno estudiado.

A partir de estas simulaciones se ha podido comprobar que los hechos denunciados por los vecinos son posibles desde el punto de vista óptico-físico. La fachada este del edificio de via Alessandro Paoli recibe más de 12 veces la iluminancia máxima del sol en su zenit en un día despejado y durante un periodo continuado. A pesar de que dicha concentración se produce en un área reducida, si dicho área se sitúa sobre una persiana de PVC, la concentración lumínica afectará al material, pudiendo producir su derretimiento.

Algunos de los datos obtenidos pueden variar respecto a las mediciones in situ debido a las limitaciones del modelo geométrico y la definición de los materiales. Aun así, la metodología es precisa y factible, así como repetible, lo que permite su aplicación a futuros diseños arquitectónicos. A pesar de que se hayan previsto medidas para mitigar estos efectos durante la vida útil del edificio, es importante pensar que incluso en el proceso de obra pueden generarse fenómenos de *rayos de la muerte*. Aunque se solucionen estos problemas con posterioridad es algo importante a tener en cuenta por las consecuencias que conlleva.



Conclusiones

Conclusiones	287
Prospectiva	291

Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis era el de estudiar las causas y efectos de la concentración lumínica debida a la reflexión de los rayos solares en las envolventes arquitectónicas. Podemos decir que dicho objetivo se ha desarrollado a lo largo de esta investigación habiendo aportado la misma un estudio profundo de los *rayos de la muerte* en la arquitectura.

Partiendo de las hipótesis planteadas al inicio de la investigación, hemos podido comprobar que tanto la geometría del edificio como la reflectividad de los materiales utilizados en la fachada influyen en la generación de concentraciones de rayos lumínicos.

La forma geométrica de un edificio va a determinar la forma de la cáustica resultante de la reflexión de los rayos solares en la fachada. Bien es cierto, que dicha cáustica también dependerá de la dirección con la que incidan los rayos en la fachada, por lo que el conocimiento de la forma se debe combinar con la localización y orientación de dicho edificio. Con ambos datos se podrá obtener la catacústica resultante que determinará si se produce concentración y en qué zonas. Sin embargo, la cáustica no nos va a permitir cuantificar el nivel de iluminancia o irradiancia de dicha concentración. Es en este caso determinante el conocer la reflectividad del material de fachada, ya que, como se ha visto en el apartado 3.2.5. *Análisis de la saturación lumínica. en la página 236*, a medida que aumenta la reflectividad, aumentan los niveles de irradiancia.

Las consecuencias de esta concentración también se han visto a lo largo de esta tesis tanto en el apartado 1.2.1. *Los rayos de la muerte. en la página 108* como en el caso de estudio analizado, donde se han reportado daños en los edificios colindantes.

Por tanto, y retomando las hipótesis de partida, conocer la forma y materialidad de un edificio nos puede ayudar a realizar una primera aproximación sobre si se pueden producir fenómenos de concentración de rayos lumínicos. Aun así, esto no dejará de ser una suposición y para conocer con certeza la posibilidad de que se produzca dicho fenómeno será necesario realizar un estudio detallado, debido a que, como se ha visto en el caso de estudio analizado en esta tesis, el entorno puede modificar los resultados que teóricamente deberían producirse, como ocurre con los casos 1M y 4M analizados.

Teniendo en cuenta esto y remarcando que el objetivo de este trabajo no es metodológico, sí que podrían extraerse algunas recomendaciones de este trabajo:

- Los valores de reflectancia de los materiales de fachada deberían mantenerse por debajo del 20%-15% para mitigar en gran medida unos valores altos de iluminancia.
- No deben orientarse las fachadas con curvaturas cóncavas de forma que puedan recibir la luz directa del sol, evitando por tanto la orientación a sur (en el hemisferio norte) o norte (en el hemisferio sur) así como este y oeste, que también presentan riesgos en primeras horas de la mañana y últimas de la tarde. Un ejemplo lo podemos ver en el caso de estudio presentado en este trabajo donde, a pesar de que las fachadas curvas se encuentran orientadas a este y oeste, se producen problemas de concentración de rayos.
- Se debe realizar siempre un estudio de impacto lumínico y energético del área urbana afectada por el edificio, buscando zonas de concentración energéticas. Este punto es determinante

porque es la única forma en la que vamos a poder obtener valores reales del proyecto concreto.

- El uso de elementos de protección solar pasiva como pueden ser voladizos o cubiertas sobre la fachada va a limitar la cantidad de los rayos incidentes en la misma. En el caso analizado del 20 de Fenchurch Street la propia forma del edificio impedía que los rayos incidieran sobre la fachada en los meses de verano, al igual que en la plaza del Palazzo la cubierta impide que se formen *rayos de la muerte* en la propia plaza.

Estas recomendaciones pueden servir de base para plantear diferentes normativas urbanísticas que regulen la concentración de energía proveniente de los rayos. Aun así, no es una tarea sencilla debido a que este fenómeno no se produce por una única causa sino por la conjunción de varios factores. Es por ello que restringir el uso de ciertos materiales o geometrías podría ser excesivamente limitante, si bien es cierto que se podría plantear por ejemplo un umbral máximo de reflectividad de los materiales utilizados en las fachadas.

Lo que sí se puede plantear es la obligatoriedad de realizar un estudio de impacto lumínico y/o energético en la zona a la manera de los estudios de impacto ambiental necesarios en ciertos proyectos. Esta obligatoriedad debería ir ligada a la determinación de un umbral de irradiancia o iluminancia que no debería poder superarse. Estos estudios deberían realizarse además analizando dos posibles situaciones. En la primera de ellas no se debería tener en cuenta los edificios del entorno y en la segunda sí se analizaría con los edificios del entorno, ya que estos pueden variar los resultados. Esto sería necesario desde una perspectiva a largo plazo, donde la ciudad por su propia naturaleza puede cambiar y por tanto el edificio que hoy existe puede que no esté mañana.

Como resultado de esta investigación se han desarrollado tres publicaciones científicas que corroboran la calidad de la misma. La primera de ellas es Sánchez-Ramos, I. et al. (2021) «Generalization of the pedal concept in bidimensional spaces. Application to the limaçon of Pascal», DYNA (Colombia), 88(216) donde se desarrolla un estudio de las propiedades geométricas de la limaçon de Pascal. Recientemente publicada tenemos Sánchez-Ramos, I. et al. (2022) «Energy and comfort . Historical evolution of the facade in Western Architecture.», VLC Arquitectura, 9(2) que trata sobre la evolución histórica de la fachada y la aparición del concepto de envolvente. Finalmente, la tercera publicación se encuentra actualmente en revisión y presenta la investigación que se ha llevado a cabo sobre el Palazzo Lombardia.

Finalmente, podemos concluir que el trabajo ha desarrollado satisfactoriamente los objetivos planteados y ha demostrado el interés y la novedad de la temática estudiada. Este trabajo sirve de base para próximos estudios sobre *rayos de la muerte* en los que se podrán evaluar con más detalle cuestiones relacionadas con lo tratado y que se desarrollan en el apartado de prospectiva.

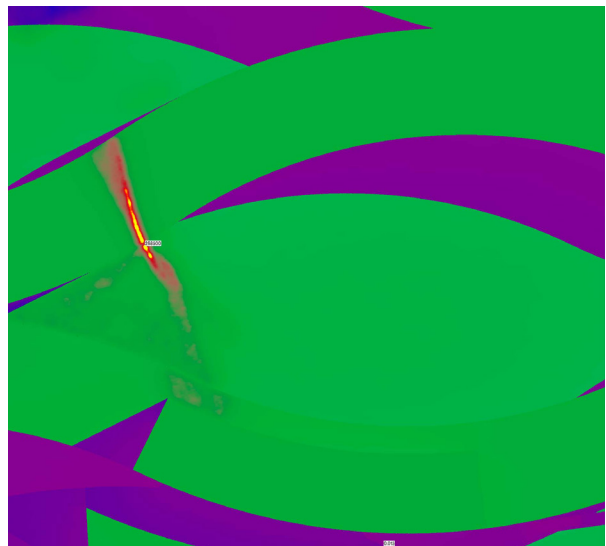
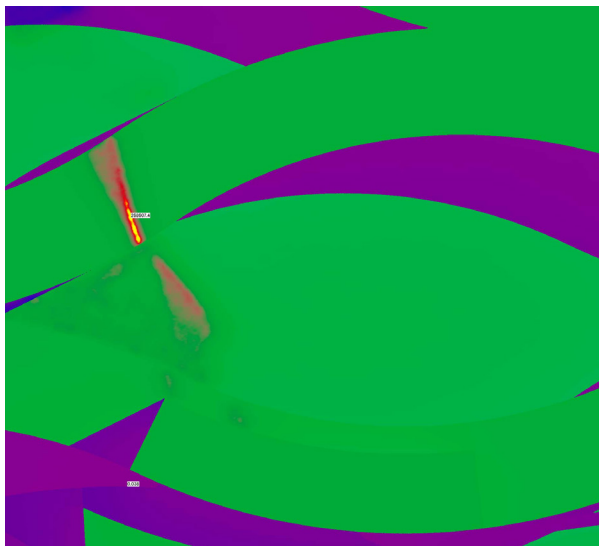
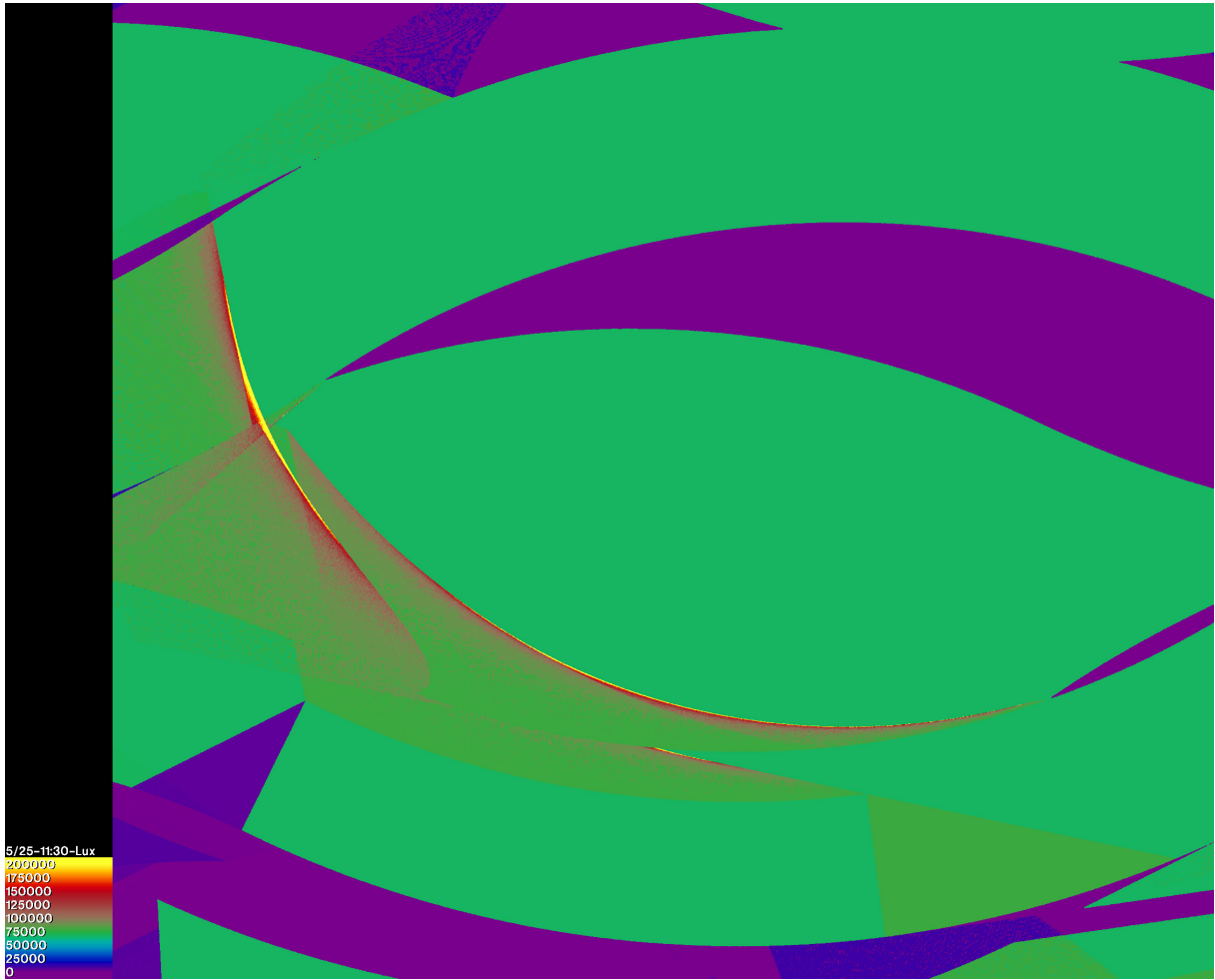
Limitaciones

Esta investigación ha presentado ciertas limitaciones. Primeramente, la documentación sobre el software utilizado se ha encontrado sesgada y de difícil acceso. Es por ello que es probable que no se haya utilizado todo el potencial de dicho programa. Además, como cualquier herramienta, Radiance presenta ciertas limitaciones en la precisión que se pueden solventar en muchas ocasiones con una generación de las imágenes más exhaustiva, aumentando por ejemplo la resolución. Sin embargo, esto aumenta en gran medida el coste computacional por lo que se ha debido optar por una resolución que permitiera la mejor relación calidad/

tiempo y aceptando ciertas limitaciones en cuanto a la exactitud de las mediciones.

A este respecto, Radiance tiene dificultades con el manejo de cáusticas debido a la metodología del trazado de rayos (Schregle 2021). Por tanto, con la intención de conseguir mejores resultados, se optó por atender al manual de Radiance relativo a la extensión para el mapeado de fotones (Schregle 2021) donde se especifica que dicha extensión es mucho más eficiente en el cálculo de cáusticas. Sin embargo, a la hora de llevar a la práctica dicho módulo de mapeado de fotones se observaron variaciones importantes en el resultado de casos idénticos, así como problemas en la continuidad de la curva (Fig. C.1 y C.2). Pusimos en conocimiento del creador del módulo dicho problema a través del foro de Radiance (<https://discourse.radiance-online.org/t/photon-mapping-differences-between-two-images/5776>). Sin embargo, mientras no se solucionase dicho problema tuvimos que desechar el uso del módulo de mapeado de fotones y optar por utilizar directamente el trazado de rayos propio de Radiance, que ya ha sido utilizado en otros estudios similares como los de Zhu et al. (2019), Schiler & Valmont (2005), Abdelwahab et al. (2019) y Yang et al. (2013) y validado en esta investigación.

Finalmente, otra de las limitaciones del estudio ha sido la dificultad de acceso a la información de datos sobre edificios que utilizar como caso de estudio. La intención de esta investigación era la de estudiar algún edificio que se encontrase en fase de proyecto o en fase de construcción. Sin embargo, nos ha sido imposible acceder a información de proyectos que podrían generar problemas de *rayos de la muerte* y se encontrasen en dichas fases. Consideramos que el poder colaborar en dichos proyectos habría sido altamente provechoso tanto para los propios agentes del proyecto como para esta investigación.



Prospectiva

Este trabajo abre la vía a futuras investigaciones acerca de la temática de *rayos de la muerte*. Este es un tema que no ha sido investigado previamente con la profundidad necesaria y en el que la presente investigación pretende realizar una importante aportación. Sin embargo, hay aspectos acerca de esta temática que todavía no han sido abordados o que se han desarrollado de forma ligera. Aun así, esta temática supone un gran interés de cara a afrontar los retos de la ciudad y de la arquitectura en general, por lo que se puede considerar un nicho de investigación con importante prospectiva y donde se abren nuevas vías de investigación.

Nuevas líneas de investigación

-Estudio de la viabilidad y la metodología para la generación energética a través del aprovechamiento de la concentración de rayos causada por el reflejo de la luz solar en la fachada de los edificios.

-Análisis de distintas morfologías de envolvente y los parámetros que las definen para el estudio de los efectos concentradores de energía lumínica. En este punto se está trabajando para la preparación de un artículo.

-Estudio de las propiedades geométricas de las curvas cóncavas y en concreto de la limaçon de Pascal, así como de las posibles propiedades sin descubrir de las cóncavas como inversas de una limaçon. Este punto se encuentra ya en desarrollo.

-Optimización del método de simulación del comportamiento de la luz de forma que el tiempo de computación se reduzca obteniendo resultados igual o más precisos.

Figura C.1. Simulación sin emplear el mapeado de fotones para el día 25 de mayo a las 11:30 (*Elaboración propia, 2022*)

Figura C.2. Simulaciones empleando la extensión de mapeado de fotones en donde se utilizaron las mismas condiciones tanto en ambas como en la Fig. C.1 pero se obtuvieron resultados diferentes (*Elaboración propia, 2022*)



Bibliografía comentada	297
Bibliografía	303
Índice de figuras	321
Índice de tablas	335

Bibliografía comentada

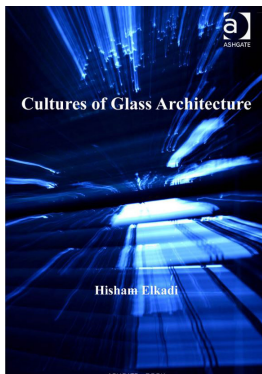
Araujo, Ramón. 2009. «El edificio como intercambiador de energía.» *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, n.o 28: 4-27.

En este artículo Araujo presenta un análisis de la evolución de la fachada y los sistemas constructivos desde una perspectiva del comportamiento energético de la fachada.



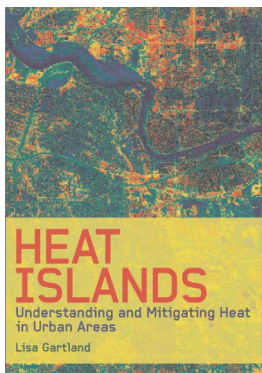
Elkadi, Hisham. 2016. *Cultures of Glass Architecture*. Aldershot: Ashgate Publishing.

Este libro presenta un detallado estudio sobre la arquitectura del vidrio, comenzando por la historia del vidrio, a través de todo del desarrollo de las distintas culturas y épocas relacionándolas con el vidrio. Además dedica un capítulo a las cuestiones técnicas del vidrio y termina con una reflexión sobre el vidrio en la actualidad y su futuro.



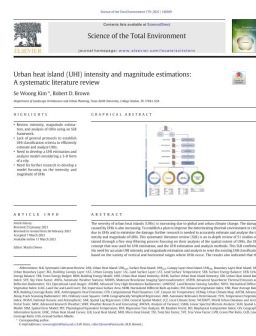
Gartland, Lisa. 2008. *Heat Islands: Understanding and mitigating heat in urban areas*. Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849771559>.

Este libro es un buen punto de partida para comprender la realidad de las islas de calor, su definición y las causas. Tras unos capítulos de introducción presenta distintas estrategias de enfriamiento para hacer frente al problema del sobrecalentamiento de las ciudades.



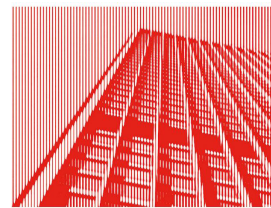
Kim, Se Woong, y Robert D. Brown. 2021. «Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review». *Science of The Total Environment* 779 (julio): 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>.

En esta *review* los autores recopilan las principales investigaciones hasta la fecha acerca de las islas de calor urbanas y analizan los criterios que utilizan dichas investigaciones para estimar y analizar la magnitud e intensidad de las mismas.



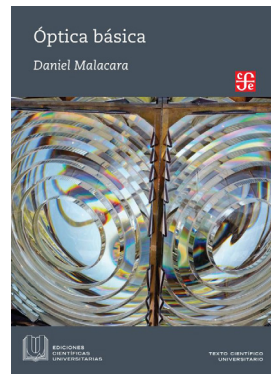
Knaack, Ulrich, Tillmann Klein, Marcel Bilow, y Thomas Auer. 2014. *Façades: Principles of construction*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.

Este libro es realiza una importante recopilación y estudio de las fachadas, tratando diferentes técnicas constructivas, analizando los tipos de aperturas en la misma y reflexionando sobre el comportamiento energético.



Malacara, Daniel. 2015. *Óptica básica*. Ediciones científicas universitarias.

Malacara realiza un importante trabajo de recopilación de los conocimientos de la óptica convirtiendo a este libro en un buen manual muy completo para estudiar óptica, tanto geométrica como física, así como lentes, láseres u óptica cuántica.



Montes, Rosana, y Carlos Ureña. 2012. «An Overview of BRDF Models». *Technical Report, University of Granada*, 1-26.

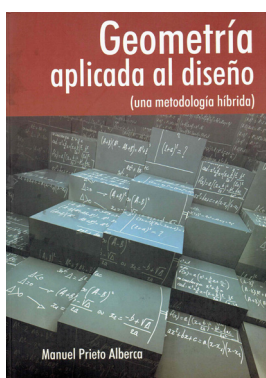
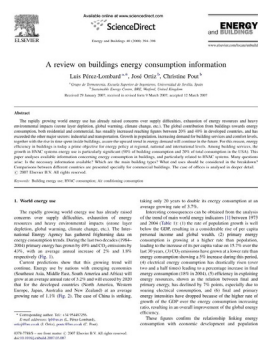
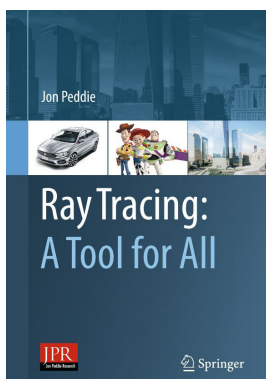
Esta es un report donde los autores analizan distintos modelos BRDF y los clasifican según sus características. Además realizan previamente una introducción sobre las BRDF en el que definen sus propiedades.



Montes-Amoros, Vicente. 2015. «When buildings attack their neighbors: Strategies for protecting against “death rays”». *CTBUH Journal*, n.o 1: 20-25.

Este artículo presenta un estudio centrado en los rayos de la muerte, sus causas y sus características. También realiza un análisis de las consecuencias que pueden producirse. Este es el primer artículo científico en el que se denomina al fenómeno estudiado *rayo de la muerte*.





Peddie, Jon. 2019. Ray Tracing: A Tool for All. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17490-3>.

Este es un buen libro donde se desarrolla el tema del *ray-tracing* en profundidad, entrando en cuestiones técnicas, así como en su aplicación.

Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, y Christine Pout. 2008. «A review on buildings energy consumption information». *Energy and Buildings* 40 (3): 394-98. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.

En este artículo los autores analizan la evolución del consumo energético de los edificios con la información presente hasta ese momento. Además también realizan predicciones de como continuará dicho consumo y lo dividen por tipologías.

Prieto Alberca, Manuel. 2010. Geometría aplicada al diseño: una metodología híbrida. Madrid: Aula Documental de Investigación.

Este libro realiza una importante recopilación del conocimiento geométrico, desde la geometría métrica a la proyectiva. Abarca dichos temas en profundidad y es un libro muy bueno para el estudio de la geometría.

Sánchez-Ramos, Irene, Fernando Meseguer-Garrido, José Juan Aliaga-Maraver, y Javier Francisco Raposo-Grau. 2021. «Generalization of the pedal concept in bidimensional spaces. Application to the limaçon of Pascal». *DYNA (Colombia)* 88 (216): 196-202.

Este artículo ha surgido como parte de la investigación de esta tesis. En él se expone una nueva aproximación al concepto de curva pedal. Además se realiza una investigación detallada sobre la limaçon de Pascal, su generación y sus propiedades.

Sánchez-Ramos, Irene, Javier Francisco Raposo-Grau, Fernando Meseguer-Garrido, y David Mediavilla-Martín. 2022. «Energy and comfort . Historical evolution of the facade in Western Architecture.», *VLC Arquitectura*, 9(2): 179-200. <https://doi.org/10.4995/vlc.2022.16542>.

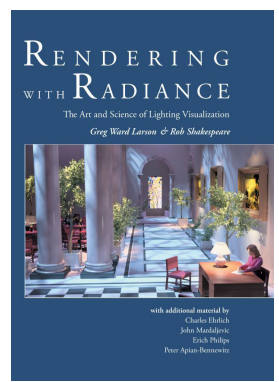
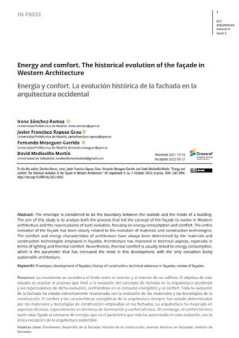
Este artículo, al igual que el anterior, también es fruto del trabajo desarrollado durante la investigación que se presenta en esta tesis. En él se desarrolla un análisis de la evolución de la fachada desde una perspectiva energética y atendiendo al confort térmico.

Ward Larson, Gregory J., y Rob Shakespeare. 2021. *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization*. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz, Publisher.

Este libro resulta casi imprescindible para abordar el trabajo con Radiance, ya que en él se expone cómo es el programa, así como trabajar con él. Consta de una primera parte en la que se pueden encontrar varios tutoriales que sirven de iniciación con la herramienta, de una segunda parte en la que se habla de sus aplicaciones y concluye con una tercera parte donde se exponen los métodos de cálculo del programa

Zhu, Jiajie, Wolfram Jahn, y Guillermo Rein. 2019. «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London». *Journal of Building Performance Simulation* 12 (4): 378-87. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>

Este artículo del que ya se ha hablado durante esta tesis, presenta un estudio de soleamiento del edificio del 20 de Fenchurch Street en Londres desarrollado con la herramienta Radiance.



Bibliografía

Introducción

- «A burning issue». 2010. *Physics World* 23 (11): 3.
- Abdelwahab, Sahar, Mariam Elhussainy, y Rania Labib. 2019. «The Negative Impact of Solar Reflections Caused by Reflective Buildings' Facades: Case Study of the Nasher Museum in Texas». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 297 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/297/1/012048>.
- Brotas, Dr Luisa, y Dr Jan Wienold. 2019. «Solar reflected glare affecting visual performance». *Proceedings - Windsor Conference 2014: Counting the Cost of Comfort in a Changing World*, n.o April: 688-93.
- Carlucci, Davide. 2009. «Il Pirellone-bis “ riscalda “ anche i vicini». *la Repubblica Milano*, 9 de septiembre de 2009.
- Codina, Lluís. 2018. «Revisiones Bibliográficas Sistematizadas. Procedimientos generales y Framework para Ciencias Humanas y Sociales.» Universitat Pompeu Fabra. https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/34497/Codina_revisiones.pdf.
- Danks, Ryan, y Joel Good. 2016. «Urban Scale Simulations of Solar Reflections in the Built Environment : Methodology & Validation». *SimAUD*, n.o May: 19-26. https://www.researchgate.net/publication/303312340_Urban_Scale_Simulations_of_Solar_Reflections_in_the_Built_Environment_Methodology_Validation.
- Duell, Mark, y Sam Webb. 2013. «Now the Walkie Talkie building is melting BICYCLES: Dazzling light reflected from giant London skyscraper scorches bike seats (and you can even fry an egg)». *Daily Mail*, 2013. <http://www.dailymail.co.uk/news/>

article-2409710/Walkie-Talkie-building-melting-bicycles-Light-reflected-construction-City-skyscraper-scorches-seat.html.

Fox, Jonathan, Paul Osmond, y Alan Peters. 2018. «The effect of building facades on outdoor microclimate-Reflectance recovery from terrestrial multispectral images using a robust empirical line method». *Climate* 6 (3). <https://doi.org/10.3390/cli6030056>.

Galatanu, Catalin D. 2017. «Study of Facades with Diffuse Asymmetrical Reflectance to Reduce Light Pollution». *Energy Procedia* 112 (October 2016): 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1100>.

Garkavenko, Alex. 2014. «Death-Ray Architecture : What Happens When You Ignore Basic Material Properties». *Architizer Journal*, 1-9. <https://architizer.com/blog/inspiration/industry/death-ray-buildings/>.

Henley, Jon. 2013. «From the Walkie Talkie to the Death Ray Hotel: buildings turn up the heat». *The Guardian*, 1-6. www.theguardian.com/artanddesign/shortcuts/2013/sep/03/walkie-talkie-death-ray-buildings-heat.

Hirning, M. B., G. L. Isoardi, y V. R. Garcia-Hansen. 2017. «Prediction of discomfort glare from windows under tropical skies». *Building and Environment* 113: 107-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.005>.

Ishak, N. M., W. N. Hien, H. S. Jenatabadi, N. A. Mustafa, y E. M.A. Zawawi. 2019. «Effect of reflective building façade on pedestrian visual comfort». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 385 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/385/1/012059>.

Jakubiec, J. Alstan, y Christoph F. Reinhart. 2014. «Assessing disability glare potential of reflections from new construction: Case study analysis and recommendations for the future».

-
- Transportation Research Record* 2449 (617): 114-22. <https://doi.org/10.3141/2449-13>.
- Lobaccaro, Gabriele, y Francesco Frontini. 2014. «Solar energy in urban environment: How urban densification affects existing buildings». *Energy Procedia* 48 (1876): 1559-69. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.176>.
- Mayerowitz, S. 2010. «Vegas Hotel Pool “Death Ray” Burns Tourists». *ABC News*. <http://abcnews.go.com/Travel/las-vegas-hotel-pool-sunlight-swimming-pool-sunlight-swimming-tourists/story?id=11739234> Paretta,.
- Montes-Amoros, Vicente. 2015. «When buildings attack their neighbors: Strategies for protecting against “death rays”». *CTBUH Journal*, n.o 1: 20-25.
- Sánchez-Ramos, Irene, Fernando Meseguer-Garrido, José Juan Aliaga-Maraver, y Javier Francisco Raposo-Grau. 2021. «Generalization of the pedal concept in bidimensional spaces. Application to the limaçon of Pascal». *DYNA (Colombia)* 88 (216): 196-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88507>.
- Sánchez-Ramos, Irene, Javier Francisco Raposo-Grau, Fernando Meseguer-Garrido, y David Mediavilla-Martín. 2022. «Energy and comfort . Historical evolution of the facade in Western Architecture.», *VLC Arquitectura*, 9(2): 179-200. <https://doi.org/10.4995/vlc.2022.16542>.
- Sánchez-Ramos, Irene, Fernando Meseguer-Garrido, y Javier Francisco Raposo-Grau. 2022. «Light concentration by solar reflection on building facades. Simulation at Palazzo Lombardia, Milan. (In review)».
- Schiler, Marc, y Elizabeth Valmont. 2005. «Microclimatic impact: Glare around the walt disney concert hall». *Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and*

- Proceedings of 30th National Passive Solar Conference 1* (May): 511-16.
- Shih, Naai Jung, y Yen Shih Huang. 2001. «An analysis and simulation of curtain wall reflection glare». *Building and Environment* 36 (5): 619-26. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00034-2).
- Stott, Rory. 2015. «Search Ends for Solution to Museum Tower's Glare Problems at Nasher Sculpture Center | ArchDaily». *ArchDaily*, 1-5. <https://www.archdaily.com/773066/search-ends-for-solution-to-museum-towers-glare-problems-at-nasher-sculpture-center>.
- Suk, Jae Yong, Marc Schiler, y Karen Kensek. 2016. «Is Exterior Glare Problematic?: Investigation on Visual Discomfort Caused by Reflected Sunlight on Specular Building Facades Daylight glare View project Online Sustainable Toolshed for Architecture Students View project». *PLEA 2016 Los Angeles - 36th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments*, n.o October. <https://www.researchgate.net/publication/306108182>.
- . 2017a. «Reflectivity and specularity of building envelopes: how materiality in architecture affects human visual comfort». *Architectural Science Review* 60 (4): 256-65. <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1336981>.
- . 2017b. «Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data». *Building and Environment* 113 (febrero): 121-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.018>.
- Synnefa, A., M. Santamouris, y I. Livada. 2006. «A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment». *Solar Energy* 80 (8): 968-81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>.
- Takebayashi, Hideki. 2016. «High-reflectance technology on building façades: Installation guidelines for pedestrian comfort».

-
- Sustainability (Switzerland)* 8 (785). <https://doi.org/10.3390/su8080785>.
- Tsangrassoulis, Aris, Mat Santamouris, y D. Asimakopoulos. 1996. «Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems». *Energy and Buildings* 24 (3): 223-30. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00981-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00981-4).
- Wainwright, Oliver. 2013. «Walkie Talkie architect 'didn't realise it was going to be so hot'». *The Guardian*, 20-22. <http://www.theguardian.com/artanddesign/2013/sep/06/walkie-talkie-architect-predicted-reflection-sun-rays>.
- Wienold, Jan, y Jens Christoffersen. 2006. «Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras». *Energy and Buildings* 38 (7): 743-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.017>.
- Yang, Xiaoming, Lars Grobe, y Wittkopf Stephen. 2013. «Simulation of reflected daylight from building envelopes». *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3673-80.
- Zhu, Jiajie, Wolfram Jahn, y Guillermo Rein. 2019. «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London». *Journal of Building Performance Simulation* 12 (4): 378-87. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>.

Parte 1

Capítulo 1.1.

- Alegre Carvajal, Esther, Genoveva Tusell García, y Jesús López Díaz. 2010. *Técnicas y medios artísticos*. Editado por UNED. Vol. 53. Editorial centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- Álvaro-Tordesillas, Antonio, Marta Alonso-Rodríguez, Carlos Montes-Serrano, y Irene Sánchez-Ramos. 2016. «El diseño de

- espacios anamórficos. El trampantojo de la sacristía de San Miguel y San Julián en Valladolid (España).» En *Prospettive architettoniche II: conservazione digitale, divulgazione e studio, II*: 19-54. Sapienza Università Editrice.
- Araujo, Ramón. 2009. «El edificio como intercambiador de energía.» *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, n.o 28: 4-27.
- Benevolo, Leonardo. 1971. *History of Modern Architecture* Vol. 1. The MIT Press.
- Cabezas Bernal, Pedro M, Juan J Cisneros Vivó, y Felipe Soler Sanz. 2014. «Anamorfosis, su historia y evolución». *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica* 19 (23): 148-61. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4995/ega.2014.2184>.
- Casas Gómez, Manuel de las. 1988. «El vidrio en la arquitectura». *Informes de la Construcción* 40 (398): 53-60. <https://doi.org/10.3989/ic.1988.v40.i398.1572>.
- Ching, Francis D. K., Mark M. Jarzombek, y Vikramaditya Prakash. 2011a. *Una historia universal de la arquitectura* vol. 1. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- . 2011b. *Una historia universal de la arquitectura* vol.2. Editorial Gustavo Gili.
- Colquhoun, Kate. 2012. *A thing in disguise. The visionary life of Joseph Paxton*. London: HarperCollins UK.
- Cooper, William. 1835. *The crown glass cutter and glazier's manual*. Edinburgh: Oliver & Boyd and Simpkin, Marshall & co.
- Elkadi, Hisham. 2016. *Cultures of Glass Architecture*. Aldershot: Ashgate Publishing.
- Ferrés Padró, Xavier. 2017. «Fachadas ligeras : un proceso hacia el límite. Diseño y construcción de fachadas ligeras : del concepto arquitectónico y el detalle técnico a la obra construida.» Universitat Politècnica de Catalunya. <https://www.tdx.cat/handle/10803/665246#page=1>.

-
- Foster+Partners. s. f. «Commerzbank Headquarters | Projects | Foster + Partners». Accedido 8 de septiembre de 2020. <https://www.fosterandpartners.com/projects/commerzbank-headquarters/>.
- Frampton, Kenneth. 1996. *Modern Architecture, A Critical History*. London: Thames and Hudson.
- García Santos, Alfonso, y Javier Tejera. 2005. «Materiales plásticos usados en arquitectura». *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción* 19: 14-31.
- Herranz García, Silvia. 2011. «Nuevos Materiales en Fachada». Universidad politécnica de Madrid.
- Knaack, Ulrich, Tillmann Klein, Marcel Bilow, y Thomas Auer. 2014. *Façades: Principles of construction*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- Kroustallis, Stefanos K. 2020. «Tesauros - Diccionarios del patrimonio cultural de España - Técnica de soplado de discos». Ministerio de Cultura y Deporte de España. 2020. <http://tesauros.mecd.es/tesauros/tecnicas/1214618>.
- Lethaby, William Richard. 1939. *Architecture. An introduction to the history and theory of the art of building*. London: Thornton Butterworth Ltd.
- Mark, Robert. 1978. «Structural Experimentation Gothic Architecture: Large-scale experimentation brought Gothic cathedrals to a level of technical elegance unsurpassed until the last century». *American Scientist* 66 (5): 542-50.
- Patterson, Mic. 2011. *Structural glass facades and enclosures*. New Jersey: Wiley.
- Pizza, Antonio. 1999. *Arte y arquitectura moderna. 1851-1933. Del Crystal Palace de Joseph Paxton a la clausura de la Bauhaus*. Barcelona: Edicions UPC.
- Purchon, W.S. 1939. «The present position and the possibilities for the future». En *Architecture. An introduction to the history and*

theory of the art of building., 239-48. Home university library of modern knowledge.

Sobaler Rodríguez, Jesús. 2018. «Luces y Sombras: Edificio Castelar y Banco de Bilbao». <http://oa.upm.es/53051/>.

Solà-Morales, Ignasi de. 1994. «High-tech. Funcionalismo o retórica.» *Revista Arquitectura* 1 300: 33-38.

Strike, James. 2004. *De la construcción a los proyectos. La influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000*. Barcelona: Editorial Reverté. https://books.google.es/books/about/De_la_construcción_a_los_proyectos.html?id=EoKt31xU6EcC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

Versailles, l'Établissement public du château du musée et du domaine national de. s. f. «L'histoire | Château de Versailles». Accedido 25 de agosto de 2020. <http://www.chateauversailles.fr/decouvrir/histoire#louis-xiii-et-les-origines-de-versailles1607---1643>.

Wurm, J. 2007. *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*. Basel: Birkhäuser Verlag AG.

Capítulo 1.2.

Aono, Yasuyuki, y Keiko Kazui. 2008. «Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century». *International Journal of Climatology* 28 (7): 905-14. <https://doi.org/10.1002/joc.1594>.

Araujo, Ramón. 2009. «El edificio como intercambiador de energía.» *Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción*, n.o 28: 4-27.

Azevedo, Juliana, Lee Chapman, y Catherine Muller. 2016. «Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature

-
- Observations». *Remote Sensing* 8 (2): 153. <https://doi.org/10.3390/rs8020153>.
- Belussi, Lorenzo, Benedetta Barozzi, Alice Bellazzi, Ludovico Danza, Anna Devitofrancesco, Carlo Fanciulli, Matteo Ghellere, et al. 2019. «A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions». *Journal of Building Engineering* 25 (April): 100772. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100772>.
- Chen, Shuo, Guomin Zhang, Xiaobo Xia, Yixing Chen, Sujeeva Setunge, y Long Shi. 2021. «The impacts of occupant behavior on building energy consumption: A review». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45 (March): 101212. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101212>.
- Deilami, Kaveh, Md Kamruzzaman, y Yan Liu. 2018. «Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 67 (November 2017): 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>.
- Economidou, M., V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, y L. Castellazzi. 2020. «Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings». *Energy and Buildings* 225 (octubre): 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>.
- Gartland, Lisa. 2008. *Heat Islands: Understanding and mitigating heat in urban areas*. Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849771559>.
- Harputlugil, Timuçin, y Pieter de Wilde. 2021. «The interaction between humans and buildings for energy efficiency: A critical review». *Energy Research & Social Science* 71 (June 2020): 101828. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101828>.
- International Energy Agency (IEA). 2021. «Total final consumption by sector, OECD, 1971-2019». Paris. 2021. <https://www.iea.org/>

data-and-statistics/charts/total-final-consumption-by-sector-oecd-1971-2019.

- Kim, Se Woong, y Robert D. Brown. 2021. «Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review». *Science of The Total Environment* 779 (julio): 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>.
- Li, Lingyan, Wanming Sun, Wei Hu, y Yongkai Sun. 2021. «Impact of natural and social environmental factors on building energy consumption: Based on bibliometrics». *Journal of Building Engineering* 37 (June 2020): 102136. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102136>.
- Li, Xiaoma, Yuyu Zhou, Sha Yu, Gensuo Jia, Huidong Li, y Wenliang Li. 2019. «Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings». *Energy* 174 (mayo): 407-19. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>.
- Meseguer Garrido, Fernando. 2014. *Instability Analysis of Incompressible Open Cavity Flows*. Tesis (Doctoral)
- Montes-Amoros, Vicente. 2015. «When buildings attack their neighbors: Strategies for protecting against “death rays”». *CTBUH Journal*, n.o 1: 20-25.
- North Sydney Council. 2020. «North Sydney development control plan 2013».
- Pacheco, R., J. Ordóñez, y G. Martínez. 2012. «Energy efficient design of building: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6): 3559-73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
- Paone, Antonio, y Jean Philippe Bacher. 2018. «The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art». *Energies* 11 (4). <https://doi.org/10.3390/en11040953>.
- Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, y Christine Pout. 2008. «A review on buildings energy consumption information».

-
- Energy and Buildings* 40 (3): 394-98. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- Sarrat, C, A Lemonsu, V Masson, y D Guedalia. 2006. «Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution». *Atmospheric Environment* 40 (10): 1743-58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.037>.
- Ulpiani, Giulia. 2021. «On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework». *Science of The Total Environment* 751 (enero): 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>.
- Wang, Chenghao, Zhi-Hua Wang, Kamil E. Kaloush, y Joseph Shacat. 2021. «Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146 (April): 111171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>.

Parte 2

Capítulo 2.1.

- Aghaei, Mohammadreza, Hossein Ebadi, Aline Kirsten Vidal de Oliveira, Shima Vaezi, Aref Eskandari, y Juan M. Castañón. 2020. «New concepts and applications of solar PV systems». En *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 349-90. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00011-9>.
- Álvarez Fernández-Balbuena, Antonio. 2011. «Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar». *Universidad Complutense de Madrid*. <https://eprints.ucm.es/15359/1/T33478.pdf>.
- Aristóteles, y Euclides. 2000. *Sobre las líneas indivisibles-Mecánica-Óptica-Catóptica-Fenómenos*. Editado por Editorial Gredos.
- Casas, Justiniano. 1994. *Óptica*. Librería PONS.
- Cornejo Rodríguez, Alejandro, y Gonzalo Urcid Serrano. 2006. «Óptica Geométrica. Resumen de conceptos y fórmulas I».

https://www-optica.inaoep.mx/~gurcid/rtb/og_acorgurc2005.pdf.

Gomez González, Emilio. 2006. «Guía básica de conceptos de óptica geométrica».

González-Cano, Agustín. 2015. «Alhacén: Una revolución óptica». *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura* 191 (775). <https://doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5001>.

Korsch, Dietrich. 1992. *Reflective optics. Choice Reviews Online*. Vol. 29. <https://doi.org/10.5860/choice.29-3955>.

Landsberg, G. S. 1983. *Óptica I*. Editorial Mir.

Malacara, Daniel. 2015. *Óptica básica*. Ediciones científicas universitarias.

Wüthrich, Charles A. 2017. «Fundamentals of imaging geometrical optics». Weimar.

Zheng, Hongfei. 2017. «Solar Energy Utilization and Its Collection Devices». En *Solar Energy Desalination Technology*, 47-171. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805411-6.00002-6>.

Capítulo 2.2.

Aghaei, Mohammadreza, Hossein Ebadi, Aline Kirsten Vidal de Oliveira, Shima Vaezi, Aref Eskandari, y Juan M. Castañón. 2020. «New concepts and applications of solar PV systems». En *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 349-90. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00011-9>.

Bell, Eric Temple. 1953. *Men of mathematics. Vol.1*. Penguin Books. ———. 1985. *Historia de las matemáticas*. Fondo de cultura económica.

Camacho Sánchez, María de la Humildad. 2001. «Transformaciones proyectivas en el plano cíclico». Editado por Manuel Prieto Alberca. Córdoba: Tesis-Universidad de Córdoba. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes.

Casas, Justiniano. 1994. *Óptica*. Librería PONS.

-
- Elkin, Jack M. 1965. «A deceptively easy problem». *The Mathematics Teacher* 58 (3): 194-99. <https://www.jstor.org/stable/27968003>.
- Ferréol, Robert. 2017a. «Anticaustic». 2017. <https://mathcurve.com/courbes2d.gb/anticaustic/anticaustic.shtml>.
- . 2017b. «Caustic». 2017. <https://mathcurve.com/courbes2d.gb/caustic/caustic.htm>.
- . 2017c. «Orthotomic curve». 2017. <https://mathcurve.com/courbes2d.gb/orthotomic/orthotomic.shtml>.
- Hungerbühler, Norbert. 2020. «The Inverse Caustic Problem». *American Mathematical Monthly* 127 (5): 387-400. <https://doi.org/10.1080/00029890.2020.1722019>.
- Lord, Eric. 2013. *Symmetry and pattern in projective geometry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4631-5>.
- Moreno Castillo, Ricardo. 2005. *Plücker y Poncelet. Dos modos de entender la geometría*. Nivola.
- Prieto Alberca, Manuel. 2010. *Geometría aplicada al diseño: una metodología híbrida*. Madrid: Aula Documental de Investigación.
- Ruiz, Jesús M. s. f. «Desargues y Pascal». Universidad Complutense de Madrid. <http://www.mat.ucm.es/~jesusr/expogp/despas.html>. Accedido 24 de abril de 2019. <http://www.mat.ucm.es/~jesusr/expogp/despas.html>.
- Sánchez-Ramos, Irene. 2018. «La enseñanza de la geometría a través de la creación de imágenes anamórficas». Universidad Politécnica de Madrid.
- . 2021. «Learning with catoptric anamorphosis. An educational experience». *Proceedings of the 3rd Interdisciplinary and Virtual Conference on Arts in Education*, 327-32.
- Sánchez-Ramos, Irene, Fernando Meseguer-Garrido, José Juan Aliaga-Maraver, y Javier Francisco Raposo-Grau. 2021. «Generalization of the pedal concept in bidimensional spaces.

Application to the limaçon of Pascal». *DYNA (Colombia)* 88 (216): 196-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88507>.

Ucke, Christian, y Christoph Engelhardt. 1996. «Playing with caustic phenomena». *GIREP Conference*, 440-44.

Parte 3

Capítulo 3.1.

Appel, Arthur. 1968. «Some techniques for shading machine renderings of solids». *Proceedings of the April 30--May 2, 1968, spring joint computer conference*, 37-45. <https://doi.org/10.1145/1468075.1468082>.

Cook, Robert L., Thomas Porter, y Loren Carpenter. 1984. «Distributed ray tracing». *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 18 (3): 137-45. <https://doi.org/10.1145/964965.808590>.

Haines, Eric, y Tomas Akenine-Möller. 2019. *Ray Tracing Gems*. Nvidia. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4427-2>.

Montes, Rosana, y Carlos Ureña. 2012. «An Overview of BRDF Models». *Technical Report, University of Granada*, 1-26.

Peddie, Jon. 2019. *Ray Tracing: A Tool for All*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17490-3>.

Roth, Scott D. 1982. «Ray Casting for Modeling Solids.» *Computer graphics and image processing* 18: 109-44.

Ward Larson, Gregory J., y Rob Shakespeare. 2021. *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization*. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz, Publisher.

Whitted, Turner. 1979. «An improved illumination model for shaded display». *Proceedings of the 6th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1979*. <https://doi.org/10.1145/1198555.1198743>.

Capítulo 3.2.

- CIE-Comission Internationale de l'Eclairage. 2003. «Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard general sky». <https://cie.co.at/publications/spatial-distribution-daylight-cie-standard-general-sky>.
- Elion, Glenn R., y Herbet A. Elion. 1979. *Electro-optics Handbook*. 1st Edition. Taylor & Francis.
- VVAA. 2015. «Manual de Radiance». <https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages>.
- Wainwright, Oliver. 2013. «Walkie Talkie architect 'didn't realise it was going to be so hot'The Guardian». *The Guardian*, 20-22. <http://www.theguardian.com/artanddesign/2013/sep/06/walkie-talkie-architect-predicted-reflection-sun-rays>.
- Zhu, Jiajie, Wolfram Jahn, y Guillermo Rein. 2019. «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London». *Journal of Building Performance Simulation* 12 (4): 378-87. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>.

Parte 4

Capítulo 4.1.

- AGC Interpane. 2018. «Performance Data. The AGCInterpane insulation glass products», septiembre de 2018.
- Carlucci, Davide. 2009. «Il Pirellone-bis “ riscalda “ anche i vicini». *La Repubblica Milano*, 9 de septiembre de 2009.
- CIE-Comission Internationale de l'Eclairage. 2002. *CIE 146:2002 CIE Equations for Disability Glare*.
- Elion, Glenn R., y Herbet A. Elion. 1979. *Electro-optics Handbook*. 1st Edition. Taylor & Francis.
- ISA S.p.A. 2010. «Palazzo Lombardia», 2010.
- Jaloxa. 2014. «BS8206-2 Glazing Calculator for Radiance». 2014.

- Oldrati, Edoardo. 2010. «Palazzo Lombardia». *Nuova Finestra* 357.
- Regione Lombardia. 2022. «Palazzo Lombardia - Il grattacielo dell'eccellenza». 2022. <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/istituzione/regione/palazzo-lombardia/storia-del-progetto-palazzo-lombardia/palazzo-lombardia-grattacielo-eccellenza/palazzo-lombardia-grattacielo-eccellenza>.
- VVAA. 2015. «Manual de Radiance». <https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages>.
- Ward Larson, Gregory J., y Rob Shakespeare. 2021. *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization*. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz, Publisher.
- Zhu, Jiajie, Wolfram Jahn, y Guillermo Rein. 2019. «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London». *Journal of Building Performance Simulation* 12 (4): 378-87. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>

Conclusiones

- Abdelwahab, Sahar, Mariam Elhussainy, y Rania Labib. 2019. «The Negative Impact of Solar Reflections Caused by Reflective Buildings' Facades: Case Study of the Nasher Museum in Texas». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 297 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/297/1/012048>.
- Sánchez-Ramos, Irene, Fernando Meseguer-Garrido, José Juan Aliaga-Maraver, y Javier Francisco Raposo-Grau. 2021. «Generalization of the pedal concept in bidimensional spaces. Application to the limaçon of Pascal». *DYNA (Colombia)* 88 (216): 196-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88507>.

-
- Sánchez-Ramos, Irene, Javier Francisco Raposo-Grau, Fernando Meseguer-Garrido, y David Mediavilla-Martín. 2022. «Energy and comfort . Historical evolution of the facade in Western Architecture.», *VLC Arquitectura*, 9(2): 179-200. <https://doi.org/10.4995/vlc.2022.16542>.
- Schiler, Marc, y Elizabeth Valmont. 2005. «Microclimatic impact: Glare around the walt disney concert hall». *Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and Proceedings of 30th National Passive Solar Conference 1* (May): 511-16.
- Schregle, Roland. 2021. «Photon Map Extension User Manual», 1-30.
- Yang, Xiaoming, Lars Grobe, y Wittkopf Stephen. 2013. «Simulation of reflected daylight from building envelopes». *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3673-80.
- Zhu, Jiajie, Wolfram Jahn, y Guillermo Rein. 2019. «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London». *Journal of Building Performance Simulation* 12 (4): 378-87. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>.

Anexos

- Sánchez-Ramos, Irene, Javier Francisco Raposo-Grau, Fernando Meseguer-Garrido, y David Mediavilla-Martín. 2022. «Energy and comfort . Historical evolution of the facade in Western Architecture.», *VLC Arquitectura*, 9(2): 179-200. <https://doi.org/10.4995/vlc.2022.16542>

Índice de figuras

Imagen de portada de parte. Fachada del edificio BNP Paribas Fortis en Bruselas (Dr. Matthias Ripp, 2014, Flickr/CC BY-2.0)

Introducción

- 0.1. Imagen de una anamorfosis catóptrica. (Elaboración propia, 2018)
- 0.2. Rueda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en donde se marcan los trabajados en esta investigación. (Elaboración propia, 2022; Material: Organización de las Naciones Unidas)
- 0.3. Reflejo de la luz solar en el 20 de Fenchurch Street (Londres) y daños provocados en un vehículo estacionado. (<https://www.dailymail.co.uk/news/article-2409710/Walkie-Talkie-building-melting-bicycles-Light-reflected-construction-City-skyscraper-scorches-seat.html> visitado el 30/06/2022 13:28)
- 0.4. Imágenes del estudio de Jakubiec y Reinhart (2014). Imagen desde la torre de control de los paneles solares (Medio) imagen analizada con una herramienta de análisis fotométrico y simulación fotométrica del entorno. (Jakubiec, J. Alstan, y Christoph F. Reinhart. 2014. «Assessing disability glare potential of reflections from new construction: Case study analysis and recommendations for the future». Transportation Research Record 2449 (617))
- 0.5. Imágenes extraídas del estudio de Danks y Good (2016) (Danks, Ryan, y Joel Good. 2016. «Urban Scale Simulations of Solar Reflections in the Built Environment : Methodology & Validation». SimAUD, n.o May, p. 21)
- 0.6. Imágenes extraídas del estudio de Schiler y Valmont (2005) (Schiler, Marc, y Elizabeth Valmont. 2005. «Microclimatic impact: Glare around the walt disney concert hall». Proceedings of the Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World,

Including Proceedings of 34th ASES Annual Conference and Proceedings of 30th National Passive Solar Conference 1 (May), p. 512)

- 0.7. Pruebas de series de simulaciones que se realizaron para validar la herramienta y la metodología de estudio. (Elaboración propia, 2020)

Parte 1

Capítulo 1.1.

- 1.1. Puerta de Ishtar en el Pergamon Museum, Babilonia, 575 a.C., actualmente trasladada al Pergamon Museum, Berlín, Alemania. (Raimond Spekking, 2004, Wikimedia Commons / CC BY-SA-4.0)
- 1.2. Bóveda de acceso al zigurat de Choga Zanbil construido hacia el 1250 a.C. en la provincia de Juzestán, Irán (Youngrobv, 2008, Flickr/CC BY-NC 2.0)
- 1.3. Grabado en acero del templo de Karnak (Egipto) por Albert Henry Payne donde se aprecian los pilonos de la entrada. Este grabado fue publicado en Berlin und seine Kunstschatze, Payne Leipzig und Dresden, ca. 1850 (Wikimedia Commons / Dominio público)
- 1.4. Ruinas del templo de Nippur, Iraq (Jasmine N. Walthall de U.S. Army, 2009, Wikimedia Commons /Dominio público)
- 1.5. Templo de Hatshepsut, Luxor, Egipto, 1503-1483 a.C. (Ijanderson, 2008, Wikimedia Commons /Dominio público)
- 1.6. Paralelo de los cinco órdenes de Arquitectura, publicado por Jean-Arnould Lèveil en Vignola. Tratado de los cinco órdenes de arquitectura., París: Casa Editorial Garnier Hermanos, 1926 (Dominio público)
- 1.7. Giovanni Paolo Panini, Interior del Panteón Roma, ca. 1734 (Wikimedia Commons /Dominio público)

-
- 1.8. Tipis apaches mescaleros en un campamento, Nuevo México, entre 1890 y 1910 (Wikimedia Commons /Dominio público)
 - 1.9. Fotografía de una yurta kirguisa, entre 1865 y 1872, recopilada por Aleksandr L. Kun publicada en el Álbum de Turquestán. Parte etnográfica., 1872, part 2, volume 2, plate 92, no. 305 (Wikimedia Commons /Dominio público)
 - 1.10. Casas tradicionales en Römerberg, Frankfurt, Alemania (Richard Innfield, 2016, Pixabay/Libre para uso comercial) y detalle del sistema de entramado de madera (Elaboración propia, 2021)
 - 1.11. Casa en construcción mediante el sistema de platform frame en Katy, Texas, Estados Unidos (Jaksmata, 2008, Wikimedia Commons /CC BY-SA-3.0)
 - 1.12. Iglesia Catedral de la Sagrada Virgen María de Lincoln, Lincoln, Reino Unido (DrMoschi, 2013, Wikimedia Commons /CC BY-SA-4.0)
 - 1.13. Iglesia de Santa María de Stralsund, Stralsund, Alemania (Darkone, 2006, Wikimedia Commons /CC BY-SA-2.5)
 - 1.14. Antigua Catedral de San Pablo en Londres, Reino Unido, grabado previo a 1561 realizado por Anton van den Wyngaerde (Francis Bond, Early Christian Architecture, 1913, Wikimedia Commons /Dominio público)
 - 1.15. Trampantojos en el cubiculum de la villa de P. Fannius Synistor en Boscoreale, ca. 50-40 a.C. (Ad Meskens, 2007, Wikimedia Commons /CC BY-SA-3.0)
 - 1.16. Andrea Pozzo, el Triunfo de San Ignacio de Loyola en la Iglesia de San Ignacio de Loyola en el Campus Martius, Roma, Italia, 1685 (Marie-Lan Nguyen, 2007, Wikimedia Commons /Dominio público)
 - 1.17. Espejos de la Galería de los Espejos del Palacio de Versalles, París, Francia (Coyau, 2011, Wikimedia Commons / CC BY-SA-3.0)

- 1.18. Vistas del jardín desde el interior del Palacio de Versalles, París, Francia (Jori Avlis, 2012, Flickr/CC BY-NC-2.0)
- 1.19. Ilustración de la Casa de los Comunes, Londres, Reino Unido, 1808-10 por Rudolph Ackermann, W H Pyne, William Combe, Augustus Pugin y Thomas Rowlandson, (British Library, Dominio Público)
- 1.20. Grabado sobre el proceso de obtención del vidrio crown (Dominio público)
- 1.21. Ventana con vidrio crown en la iglesia de San Juan, Schaffhausen, Suiza (Gostsens, 2015, Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0)
- 1.22. El gran invernadero de Chatsworth en una foto del siglo XIX, Bakewell, Reino Unido, 1840 (Dominio público)
- 1.23. Philip Henry Delamotte, Fotografía del *Crystal Palace*, Sydenham, Reino Unido, 1852 (Dominio público)
- 1.24. John Baird, Almacenes Gardner's, Glasgow, Reino Unido, 1856 (Twospoonfuls, 2012, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
- 1.25. James Bogardus and John B. Corlies, Almacenes Harper's, Nueva York, Estados Unidos, 1854 (Museo de la Ciudad de Nueva York, X2010.11.2987, ca.1870)
- 1.26. Giuseppe Mengoni, Galería Vittorio Emanuele II, Milán, Italia, 1865-1877 (Elaboración propia, 2016)
- 1.27. Pierre Cuypers, Estación de Amsterdam Centraal, Amsterdam, Países Bajos, 1889 (Mario Modesto Mata, 2013, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
- 1.28. Thomas Marsh Nelson, Estación de London King's Cross, Londres, Reino Unido, 1851-52 (Popperfoto, ca. 1900, Getty Images /libre para uso comercial)
- 1.29. Alberto de Palacio, Estación del mediodía, actualmente llamada Estación de Atocha, Madrid, España, 1889 (Smiley.toerist, 1981 Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)

-
- 1.30. Gyula Rochlitz y János Feketeházy, Estación de Budapest-Keleti, Budapest, Hungría, 1884 (Markv, 2005, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
 - 1.31. Le Corbusier, Capilla de Notre Dame du Haut, Ronchamp, France, 1950-1955 (Ben Ledbetter, 2019, Flickr / CC BY 2.0)
 - 1.32. Enrich Mendelsohn, Torre Einstein, Postdam, Alemania, 1921 (Astrophysikalisches Institut Postdam, 2005)
 - 1.33. Rafael Moneo, Museo Nacional de Arte Romano de Mérida, España, 1986 (Ángel M. Felicísimo, 2009, Flickr / CC BY-SA 2.0)
 - 1.34. Louis I. Kahn, Iglesia Unitaria de Rochester, Nueva York, Estados Unidos, 1959 (Whywhynot, 2011, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
 - 1.35. Louis I. Kahn, Jatiyo Sangsad Bhaban, Daka, Bangladés, 1982 (Rossi101 at English Wikipedia, 2011, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
 - 1.36. Kisho Kurokawa, Torre Nakagin, Tokio, Japón, 1972 (Jordi Meow, 2013, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
 - 1.37. Foster and partners, Torre Commerzbank, Frankfurt, Alemania, 1997 (Mylius, 2009, Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0)
 - 1.38. Richard Rogers y Renzo Piano, Centro Pompidou, París, Francia, 1977 (Katie, usuario:ktee1026, 2006, Flickr / CC BY 2.0)
 - 1.39. Rafael de la Hoz, Edificio Castelar, Madrid, España, 1977-1983 (Triplecaña, 2018, Wikimedia Commons / CC BY 2.0)
 - 1.40. Foster and Partners, edificio Willis Faber & Dumas, Ipswich, Reino Unido, 1970-1975 (TKCA Photography, 2015, Flickr / CC BY 2.0) y detalle del sistema de fachada (Elaboración propia, 2021).
 - 1.41. Bohlin Cywinski Jackson Studio, Apple Store en la Quinta Avenida, Nueva York, Estados Unidos, 2006 (Peter Aaron, Sitio web oficial de Bohlin Cywinski Jackson Studio)

- 1.42. Frank Ghery, Museo Guggenheim, Bilbao, España, 1997 (PA, 2015, Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0)
- 1.43. Zaha Hadid, Centro Heydar Aliyev, Bakú, Azerbaiyán, 2012 (RElton, 2012, CC BY-SA 4.0)

Capítulo 1.2.

- 1.44. Heliostatos situados en la ladera frente a Rjukan (Erik Må, 2014, Flickr / CC BY-NC-SA-2.0)
- 1.45. Plaza de Rjukan iluminada gracias a los heliostatos (METAL CIRCLE, 2021, Flickr / Todos los derechos reservados)
- 1.46. Pueblo de Viganella iluminado por los heliostatos situados en la montaña (Silvia Camporesi / <https://www.artribune.com/arti-visive/2021/01/viganella-sole-specchio/> visitado el 03/05/2022 18:45)
- 1.47. Rafael Viñoly, 20 de Fenchurch Street (GillyBerlin, 2018, Flickr / CC BY-SA-2.0)
- 1.48. Frank Ghery, Walt Disney Concert Hall (Antoine Taveneaux, 2011, Wikimedia Commons / CC BY-SA-3.0)
- 1.49. Gráfica del consumo total de energía por región en el mundo entre 1971 y 2017 (International Energy Agency, 2022, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-final-consumption-by-region-1971-2017>)
- 1.50. Gráfica del consumo total de energía por sector en el entorno OECD entre 1971 y 2019 (International Energy Agency, 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-final-consumption-by-sector-oecd-1971-2019>)
- 1.51. El gradiente de temperatura convencional en la atmósfera terrestre produce que las partículas del aire se dispersen. Sin embargo, cuando se produce el fenómeno de inversión térmica, una capa de aire caliente impide dicha dispersión (Elaboración propia, 2022)
- 1.52. En las calles altas y estrechas se produce el efecto de cañón urbano, ya que el viento se encajona y genera vórtices (Elaboración propia, 2022) y calle en Nueva York con dichas características (Daxis, 2013, Flickr / CC BY-ND-2.0)

Parte 2

Capítulo 2.1.

- 2.1. Mapa conceptual de la clasificación de las ramas de la óptica (Elaboración propia, 2022)
- 2.2. Leyes básicas de la óptica geométrica (Elaboración propia, 2022)
- 2.3. Arriba se presenta un sistema stigmático, es decir, los rayos que parten del punto O se concentran en O' al atravesar dicho sistema. El sistema óptico de abajo no es stigmático debido a que no se concentran los rayos en un único punto al atravesar el sistema (Elaboración propia, 2022)
- 2.4. Resumen de las aberraciones de Seidel I (Elaboración propia, 2022)
- 2.5. Resumen de las aberraciones de Seidel II (Elaboración propia, 2022)
- 2.6. Los concentradores solares consisten en un elemento reflector que recoge los rayos solares y los dirige hacia el elemento concentrador. En la imagen se encuentran los concentradores de la planta termosolar Nevada Solar One de Acciona (Elaboración propia sobre imagen, 2022; Imagen de fondo: Acciona, <https://mediacdn.acciona.com/media/z1mlayat/termosolar-nevada-solar-one-1-acciona.jpg>)

Capítulo 2.2.

- 2.7. Los fundamentos de la geometría proyectiva se basan en las operaciones de proyección y sección (Elaboración propia, 2022)
- 2.8. Teorema de Desargues (Elaboración propia, 2022)
- 2.9. El hexagrama mysticum o teorema de Pascal aplicado a todas las cónicas (Elaboración propia, 2022)
- 2.10. Extracto del libro Elements of projective geometry de Cremona en el que se aprecia la práctica de escribir los enunciados

de forma dual (Cremona, Luigi, 1885, Elements of projective geometry. Translated by Charles Leudesdorf, <https://archive.org/details/elementsproject02cremgoog>)

- 2.11. Propiedades fundamentales de la proyectividad (Elaboración propia, 2022)
- 2.12. Ejemplos de reflexión y refracción en sistemas no stigmáticos donde los rayos reflejados y refractados no confluyen en un único punto sino que generan una cáustica (Elaboración propia, 2022)
- 2.13. Superficie cáustica generada por la reflexión de los rayos que parte desde V en la curva. La intersección de dicha superficie con el plano también se considera una cáustica (Elaboración propia, 2022)
- 2.14. La cáustica por reflexión coincide con la evoluta de la ortotómica de la curva reflectante (Elaboración propia, 2022)
- 2.15. La cáustica por refracción coincide con la evoluta de la anticáustica de la curva refractante (Elaboración propia, 2022)
- 2.16. La cáustica de la imagen es virtual, debido a que se encuentra formada por la prolongación de los rayos reflejados y no por los propios rayos (Elaboración propia, 2022)
- 2.17. Cáustica por reflexión de una circunferencia desde un punto de la misma (Elaboración propia, 2022)
- 2.18. Cáustica por reflexión de una circunferencia desde un punto exterior (Elaboración propia, 2022)
- 2.19. Cáustica por reflexión de una circunferencia desde el punto impropio (Elaboración propia, 2022)
- 2.20. Limaçon de Pascal como cáustica de una circunferencia paralela al plano de sección o plano del cuadro (Elaboración propia, 2022) y Proyección ortogonal de la Limaçon (Elaboración propia, 2022)
- 2.21. Cáustica de una circunferencia no paralela al plano de sección o plano del cuadro (Elaboración propia, 2022) y Proyección ortogonal de dicha curva (Elaboración propia, 2022)

-
- 2.22.Limaçon como inversa de una cónica tomando como centro de inversión uno de los focos de la misma (Elaboración propia, 2020)
- 2.23.Limaçon como curva podal de una circunferencia, independientemente del ángulo que forme con la tangente (Elaboración propia, 2020)
- 2.24.Limaçon como lugar geométrico de puntos desde donde las tangentes a dos circunferencias forman un ángulo determinado (Elaboración propia, 2020)
- 2.25.El polo de la limaçon (o la curva homóloga), en el caso de limaçones hiperbólicas, recibe el reflejo de dos puntos de la circunferencia (Elaboración propia, 2022)
- 2.26.El polo de la limaçon (o la curva homóloga) se encuentra alineado con el vértice del haz de rayos y el centro de la circunferencia (Elaboración propia, 2022)
- 2.27.En los alrededores del polo de la limaçon la concentración de rayos es mayor (Elaboración propia, 2022) y Proyección ortogonal de la curva donde los puntos son la intersección de los rayos reflejados en puntos equidistantes en la circunferencia (Elaboración propia, 2022) y Detalle de la reflexión de rayos en puntos equidistantes en la circunferencia (Elaboración propia, 2022)
- 2.28.Enunciado del problema de Alhacén (Elaboración propia, 2022)

Parte 3

Capítulo 3.1.

- 3.1. El ray-casting es una técnica para analizar la posición de las distintas superficies respecto a la cámara. Para ello, se emite un rayo desde la cámara y se analiza la distancia de los puntos de intersección de las superficies a la cámara (Elaboración propia, 2022)

- 3.2. Gráfico en el que se muestran el número de artículos publicados sobre el ray-tracing por año. El último año se produce un descenso por ser el año de estudio y no encontrarse completo (Peddie, J. (2019) Ray Tracing: A Tool for All. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-17490-3, p. 23)
- 3.3. En el renderizado mediante el ray-tracing se divide el plano del cuadro en píxeles y se emiten rayos por cada uno de ellos para calcular el valor del mismo (Elaboración propia, 2022)
- 3.4. Una vez los rayos emitidos se intersecan con alguna superficie se dirige un rayo hacia el/los foco/s de luz para calcular el valor de dicho punto. Se pueden realizar varios rebotes para mayor precisión (Elaboración propia, 2022)
- 3.5. Modelo renderizado con un método determinista (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 21) y Modelo renderizado con un método estocástico (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 22) y Modelo renderizado con un método híbrido (Ward Larson, G. J. y Shakespeare, R. (2021) Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization. Electronic. Tacoma, Washington: Randolph M. Fritz Publisher, plate 24)
- 3.6. Mapa conceptual de distintos modelos BRDF (Montes, R. y Ureña, C. (2012) «An Overview of BRDF Models», Technical Report, University of Granada, pp. 1-26, p. 6)

Capítulo 3.2.

- 3.7. Detalle de las zonas en las que se sitúan los puntos p1, p3 y p5 donde se aprecia la discretización de la iluminancia debida a la discretización de la geometría. Esta imagen se corresponde con el 21 de octubre a las 12:00 (Elaboración propia, 2022)

-
- 3.8. Resumen de los resultados del análisis de la continuidad física de las simulaciones (Elaboración propia, 2022)
- 3.9. Al pixelarse una imagen, se pierde variedad de tonalidades debido a que se debe aplicar un valor homogéneo a cada píxel (Elaboración propia, 2022)
- 3.10. Resumen de los resultados del análisis de la resolución de la imagen (Elaboración propia, 2022)
- 3.11. Resumen de los resultados del análisis de la resolución de la geometría (Elaboración propia, 2022)
- 3.12. Resumen de los resultados del análisis de la variación de la reflectividad (Elaboración propia, 2022)
- 3.13. Rafael Viñoly, 20 de Fenchurch Street (35mmMan, 2020, Flickr / CC BY 2.0)
- 3.14. Resultados obtenidos por los autores del artículo de referencia para el 29 de agosto de 2013: a las 11:40, a las 12:00, a las 12:40 y a las 13:20 (Zhu, J., Jahn, W. y Rein, G. (2019) «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London», *Journal of Building Performance Simulation*, 12(4), p. 384)
- 3.15. Resultados obtenidos para el 29 de agosto de 2013: a las 11:40, a las 12:00, a las 12:40 y a las 13:20 (Elaboración propia, 2022)
- 3.16. Resultados obtenidos por los autores del artículo de referencia para el 12 de octubre de 2013: a las 11:40, a las 12:00, a las 12:40 y a las 13:20 (Zhu, J., Jahn, W. y Rein, G. (2019) «Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London», *Journal of Building Performance Simulation*, 12(4), p. 385)
- 3.17. Resultados obtenidos para el 12 de octubre de 2013: a las 11:40, a las 12:00, a las 12:40 y a las 13:20 (Elaboración propia, 2022)
- 3.18. Gráfica de iluminancia máxima a las 13:00, 13:20 y 13:40 a lo largo de todo el año (Elaboración propia, 2022)

Parte 4

Capítulo 4.1.

- 4.1. Pei Cobb Freed & Partners, Palazzo Lombardia (Mauro Gambini, 2010, Flickr/CC BY-NC-ND 2.0)
- 4.2. Boceto sobre la concepción geométrica del Palazzo Lombardia. (Pei Cobb Freed & Partners: <https://www.pcf-p.com/projects/palazzo-lombardia/>)
- 4.3. Plano de situación del Palazzo Lombardia. (Pei Cobb Freed & Partners: <https://www.pcf-p.com/projects/palazzo-lombardia/>)
- 4.4. Modelo tridimensional empleado en el estudio con el entorno (Elaboración propia, 2022) y modelo tridimensional empleado en el estudio sin el entorno (Elaboración propia, 2022)
- 4.5. Vista cenital empleada para la primera y segunda fases del estudio. Se remarcan las seis áreas donde se detectaron casos de *rayos de la muerte*. (Elaboración propia, 2022; Imagen de fondo: <https://zoom.earth/>)
- 4.6. Casos estudiados atendiendo al azimut (eje x) y la elevación (eje y). Los casos correspondientes a la Fase 1 se representan mediante triángulos azules, los correspondientes a la Fase 2 se representan con estrellas naranjas y los de la Fase 3 con cuadrados amarillos. (Elaboración propia, 2022)
- 4.7. Detalle de las áreas afectadas por las reflexiones solares en las fachadas este. La imagen de fondo se corresponde con el 21 de junio a las 8:15. (Elaboración propia, 2022)
- 4.8. Incidencia de los rayos solares en la zona 1. Las imágenes muestran el momento de máxima iluminancia obtenidos en el estudio sin los edificios del entorno el 12 de junio a las 9:05 y en el estudio con los edificios del entorno el 9 de junio a las 8:15 (Elaboración propia, 2022)
- 4.9. Casos estudiados cuando la radiación solar incide en las fachadas este del edificio. Las imágenes muestran el momento en el que aparece el valor máximo en cada área: el 19 de junio

-
- a las 9:30 en la zona 2 y 18 de junio a las 8:15 en la zona 3 (Elaboración propia, 2022)
- 4.10. Incidencia de los rayos solares en la zona 4 en horario de mañana. Las imágenes muestran el momento de máxima iluminancia obtenidos en el estudio sin los edificios del entorno el 13 de agosto a las 9:40 y en el estudio con los edificios del entorno el 4 de agosto a las 9:30 (Elaboración propia, 2022)
- 4.11. Detalle de las áreas afectadas por las reflexiones solares en las fachadas oeste. La imagen de fondo se corresponde con el 21 de junio a las 17:15 (Elaboración propia, 2022)
- 4.12. Casos estudiados cuando la radiación solar incide en las fachadas este del edificio. Las imágenes muestran el momento en el que aparece el valor máximo en cada área: 24 de junio a las 15:50 en la zona 2, 10 de junio a las 16:35 en la zona 5 y 19 de junio a las 17:20 en la zona 6 (Elaboración propia, 2022)
- 4.13. Incidencia de los rayos solares en la zona 4 en horario de tarde. Las imágenes muestran (Arriba) el momento de máxima iluminancia obtenido en el estudio sin los edificios del entorno el 16 de junio a las 16:25 y en el estudio con los edificios del entorno, el momento de máxima iluminancia el 1 de junio a las 16:10 y la afección a mayor área de la fachada el 1 de junio a las 16:55 (Elaboración propia, 2022)

Conclusiones

- C.1. Simulación sin emplear el mapeado de fotones para el día 25 de mayo a las 11:30 (Elaboración propia, 2022)
- C.2. Simulaciones empleando la extensión de mapeado de fotones en donde se utilizaron las mismas condiciones tanto en ambas dos como en la Fig. C.1 pero se obtuvieron resultados diferentes (Elaboración propia, 2022)

Índice de tablas

Parte 2

Capítulo 2.1.

- 2.1. Selección de algunas de las más relevantes unidades radiométricas y fotométricas (Elaboración propia, 2022)

Parte 4

Capítulo 4.1.

- 4.1. Resumen de las fases que componen este estudio y los intervalos temporales estudiados en cada fase de la investigación (Elaboración propia, 2022)
- 4.2. Tabla resumen correspondiente a los casos de estudio afectados en las fachadas este (Elaboración propia, 2022)
- 4.3. Tabla resumen correspondiente a los casos de estudio afectados en las fachadas oeste (Elaboración propia, 2022)



Anexos

Tablas evolución histórica	339
Líneas de tiempo	345
Código validación	353
Código casos de estudio	361

Tablas evolución histórica

A continuación se adjuntan varias tablas que han sido elaboradas para el artículo *Energy and comfort. Historical evolution of the facade in Western Architecture*. (Sánchez-Ramos et al. 2022) desarrollado durante la investigación que se presenta en esta tesis.

Estas tablas presentan un análisis de la evolución del confort y el consumo energético de la arquitectura a lo largo de la Historia y complementa la información presentada en el capítulo 1.1. *Evolución histórica* en la página 53.

		RIVER VALLEY CIVILIZATIONS	
		5,000 BC - 750 BC	
		POPULAR	MONUMENTAL
TECHNOLOGY	MATERIAL	ADOBE	STONE
	MAX. HEIGHT	up to 5 m	5-30 m
	DISTANCE RANGE	up to 5 km	50-100 km
	EXECUTION TIME	up to 1 year	> 20 years
	ECONOMIC COST	scarce	huge
COMFORT	THERMAL	poor	medium
	LIGHTING	very poor	very poor
ENERGY CONSUMPTION	MANUFACTURING	scarce	medium
	USAGE	low	scarce

scarce low medium significant huge
 very poor poor medium good very good

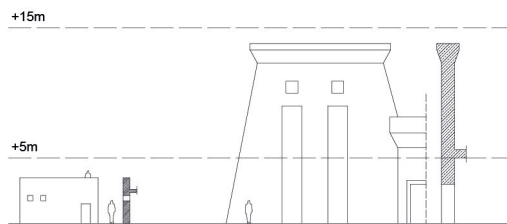


Figura A.1. Características de la arquitectura de las civilizaciones del Valle del Río. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

		GRECO-ROMAN WORLD	
		750 BC - 500 AD	
		POPULAR	MONUMENTAL
TECHNOLOGY	MATERIAL	BRICK	STONE/BRICK
	MAX. HEIGHT	5-30 m	30-50 m
	DISTANCE RANGE	5-15 km	> 100 km
	EXECUTION TIME	1-3 years	10-20 years
	ECONOMIC COST	medium	huge
COMFORT	THERMAL	poor	medium
	LIGHTING	poor	poor
ENERGY CONSUMPTION	MANUFACTURING	low	medium
	USAGE	scarce	medium

scarce low medium significant huge
 very poor poor medium good very good



Figura A.2. Características de la arquitectura del mundo grecorromano. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

		MIDDLE AGES/EARLY MODERN PERIOD		
		500 AD - 1700 AD		
		CIVIL	RELIGIOUS	MILITAR
TECHNOLOGY	MATERIAL	ADOBE/WOOD/GLASS	STONE/GLASS	STONE
	MAX. HEIGHT	5-30 m	> 10 m	30-50 m
	DISTANCE RANGE	15-50 km	15-50 km	5-15 km
	EXECUTION TIME	1-3 years	> 20 years	3-10 years
	ECONOMIC COST	medium	huge	significant
COMFORT	THERMAL	poor	medium	medium
	LIGHTING	poor	very good	very poor
ENERGY CONSUMPTION	MANUFACTURING	medium	significant	medium
	USAGE	low	low	low

scarce low medium significant huge
 very poor poor medium good very good

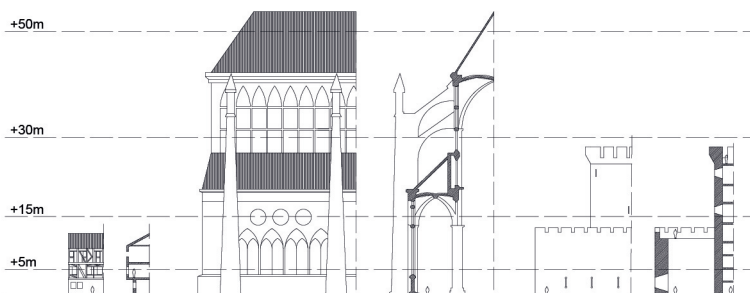


Figura A.3. Características de la arquitectura de la Edad Media y de la primera época moderna. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

		INDUSTRIAL REVOLUTION		
		1700 AD - 1900AD		
		POPULAR	PUBLIC	INDUSTRIAL
TECHNOLOGY	MATERIAL	BRICK/GLASS	BRICK/GLASS	BRICK/GLASS
	MAX. HEIGHT	5-30 m	30-50 m	30-50 m
	DISTANCE RANGE	50-100 km	> 100 km	50-100 km
	EXECUTION TIME	1-3 years	3-10 years	up to 1 year
	ECONOMIC COST	scarce	medium	low
COMFORT	THERMAL	poor	good	medium
	LIGHTING	medium	good	good
ENERGY CONSUMPTION	MANUFACTURING	medium	significant	significant
	USAGE	low	medium	medium

scarce low medium significant huge
 very poor poor medium good very good



Figura A.4. Características de la arquitectura de la Revolución Industrial. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

		20th / 21st CENTURIES		
		1900 AD - NOWADAYS		
		RESIDENTIAL	PUBLIC	CORPORATIVE
TECHNOLOGY	MATERIAL	BRICK/CONCRETE	STEEL/GLASS	STEEL/GLASS
	MAX. HEIGHT	50-100 m	> 10 m	> 10 m
	DISTANCE RANGE	> 100 km	> 100 km	> 100 km
	EXECUTION TIME	1-3 years	3-10 years	1-3 years
	ECONOMIC COST	low	significant	huge
COMFORT	THERMAL	good	good	good
	LIGHTING	very good	very good	good
ENERGY CONSUMPTION	MANUFACTURING	huge	huge	huge
	USAGE	medium	medium	significant

scarce low medium significant huge
 very poor poor medium good very good

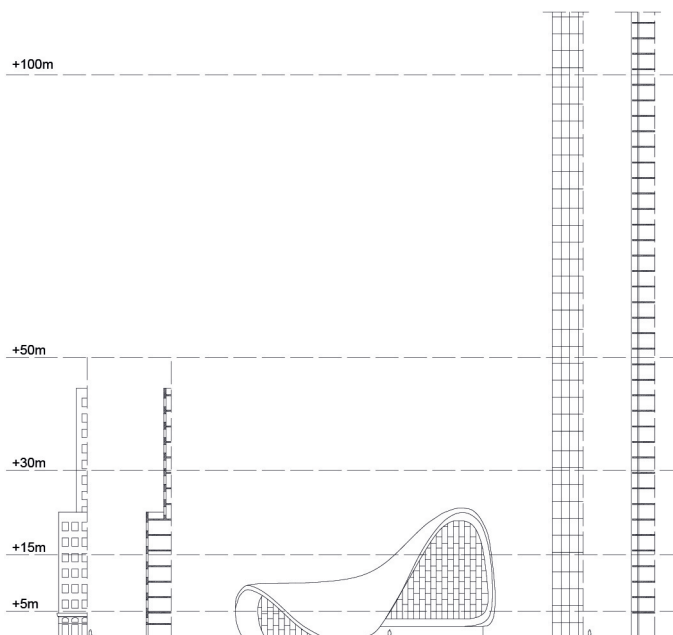


Figura A.5. Características de la arquitectura de los siglos XX y XXI.
 (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

Figura A.6. Cuadro comparativo de la evolución de las capacidades tecnológicas, así como del confort y el consumo energético. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

		TECHNOLOGY					COMFORT		ENERGY CONSUMPTION	
		MATERIAL	MAX. HEIGHT	DISTANCE RANGE	EXECUTION TIME	ECONOMIC COST	THERMAL	LIGHTING	MANUFACTURING	USAGE
RIVER VALLEY CIVILIZATIONS 5,000 BC - 750 BC	POPULAR	ADOBE	*	*	*	*	**	*	*	**
	MONUMENTAL	STONE	***	****	*****	*****	***	*	***	*
GRECO-ROMAN WORLD 750 BC - 500 AD	POPULAR	BRICK	**	**	**	***	**	**	**	*
	MONUMENTAL	STONE BRICK	***	****	****	****	***	**	***	***
MIDDLE AGES/ EARLY MODERN PERIOD 500 AD - 1700 AD	CIVIL	ADOBE WOOD GLASS	**	***	**	***	**	***	***	**
	RELIGIOUS	STONE GLASS	*****	***	*****	*****	***	*****	*****	**
	MILITAR	STONE	***	**	***	****	***	*	***	**
INDUSTRIAL REVOLUTION 1700 AD - 1900AD	POPULAR	BRICK GLASS	**	****	**	*	**	***	***	**
	PUBLIC	BRICK GLASS	***	****	***	****	****	****	****	***
	INDUSTRIAL	BRICK GLASS	****	****	*	**	***	****	****	***
20th / 21st CENTURIES 1900 AD - NOWADAYS	RESIDENTIAL	BRICK CONCRETE	****	*****	**	**	****	*****	*****	***
	PUBLIC	STEEL GLASS	*****	*****	***	****	****	*****	*****	**
	CORPORATIVE	STEEL GLASS	*****	*****	**	*****	****	****	*****	****

Líneas de tiempo

A continuación se adjuntan varias líneas de tiempo que han sido elaboradas para el artículo *Energy and comfort. Historical evolution of the facade in Western Architecture*. (Sánchez-Ramos et al. 2022) desarrollado durante la investigación que se presenta en esta tesis.

Estas líneas de tiempo presentan en orden cronológico importantes hitos y avances en la Historia de la Arquitectura así como en la evolución de los materiales de construcción y complementa la información presentada en el capítulo 1.1. *Evolución histórica* en la página 53.

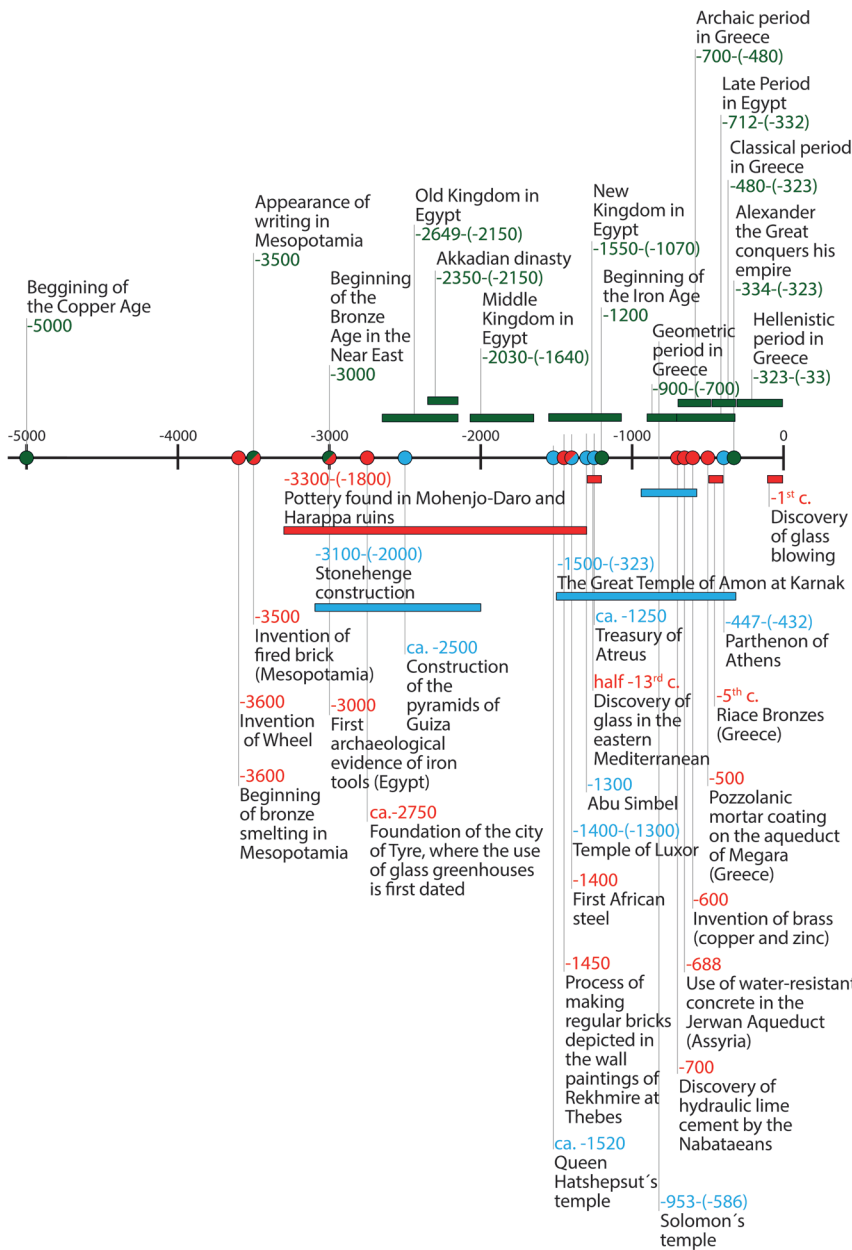


Figura A.7. Entre el 5000 a.C. y el año 0 se produce un desarrollo de la tecnología metalúrgica y también el desarrollo de las grandes civilizaciones antiguas. Se empezaron a construir importantes obras arquitectónicas que han llegado hasta nuestros días. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

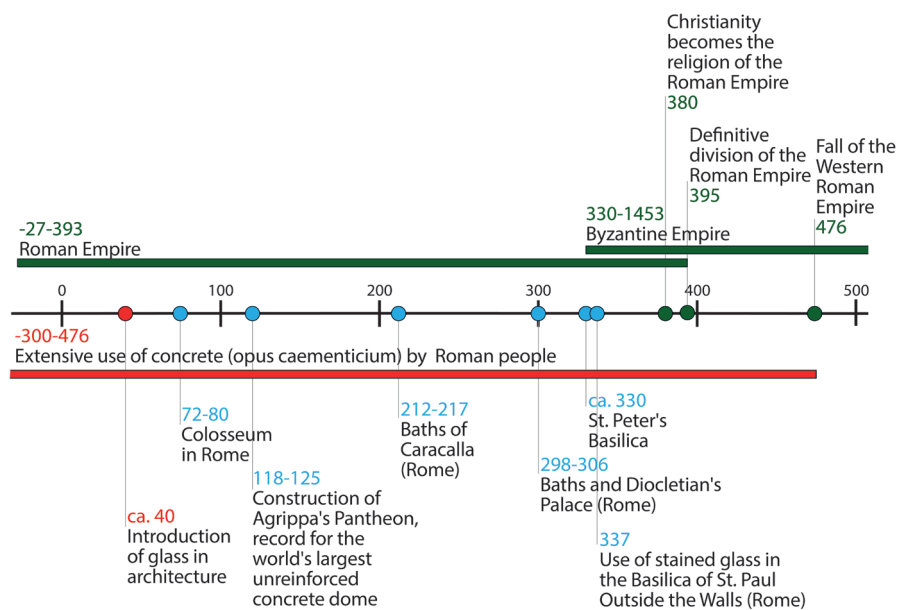


Figura A.8. El auge y la caída del Imperio Romano se produjeron entre el 0 y el 500 d.C. Durante este periodo se produjo un amplio uso del opus caementicium y la aparición del vidrio en la arquitectura. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

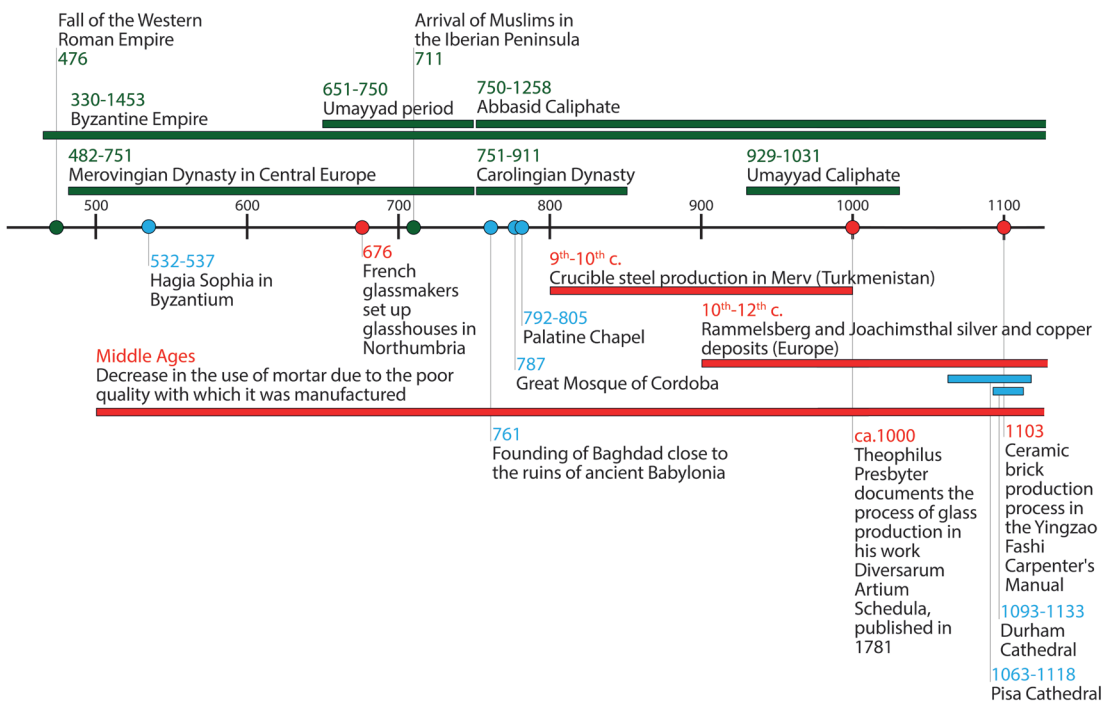


Figura A.9. Tras la caída del Imperio Romano, la calidad del mortero disminuyó y, en consecuencia, también su uso. Durante este periodo, las técnicas de producción de metales y vidrio fueron mejorando lentamente, lo que tendría una gran influencia en los siglos siguientes. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

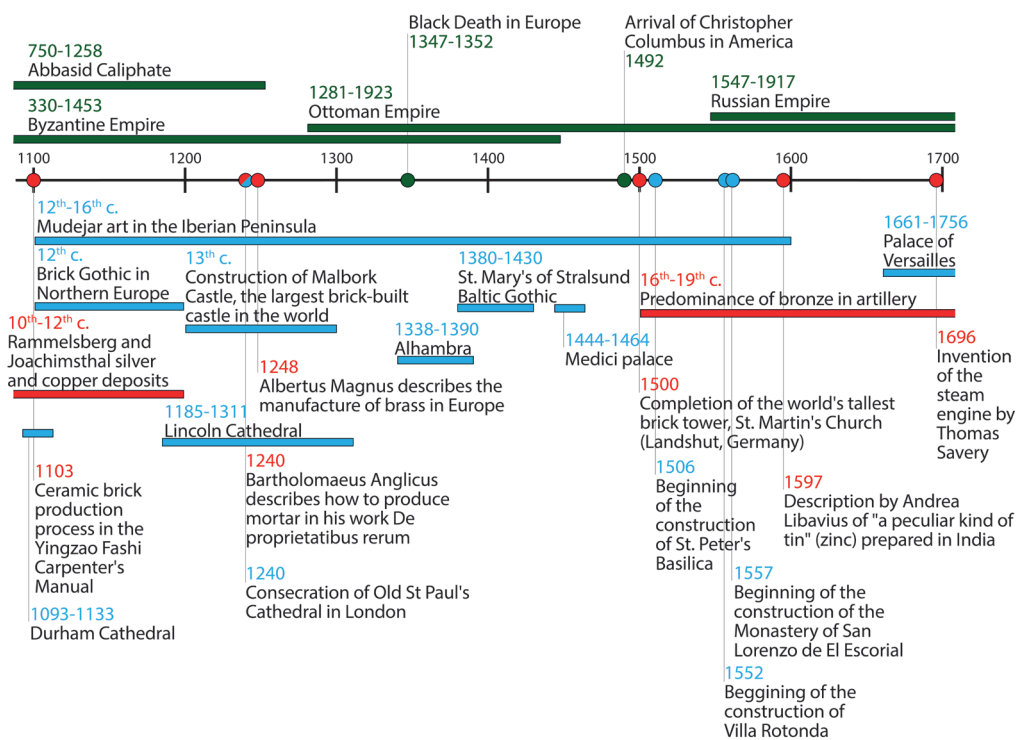


Figura A.10. En la Baja Edad Media el ladrillo tuvo una gran influencia tanto en las regiones del sur de Europa con el mudéjar como estilo típico como en el norte de Europa con el gótico de ladrillo. Aparecen las grandes construcciones góticas, que constituyen un gran avance espacial, estructural y tecnológico que tendrá continuidad en las construcciones renacentistas. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

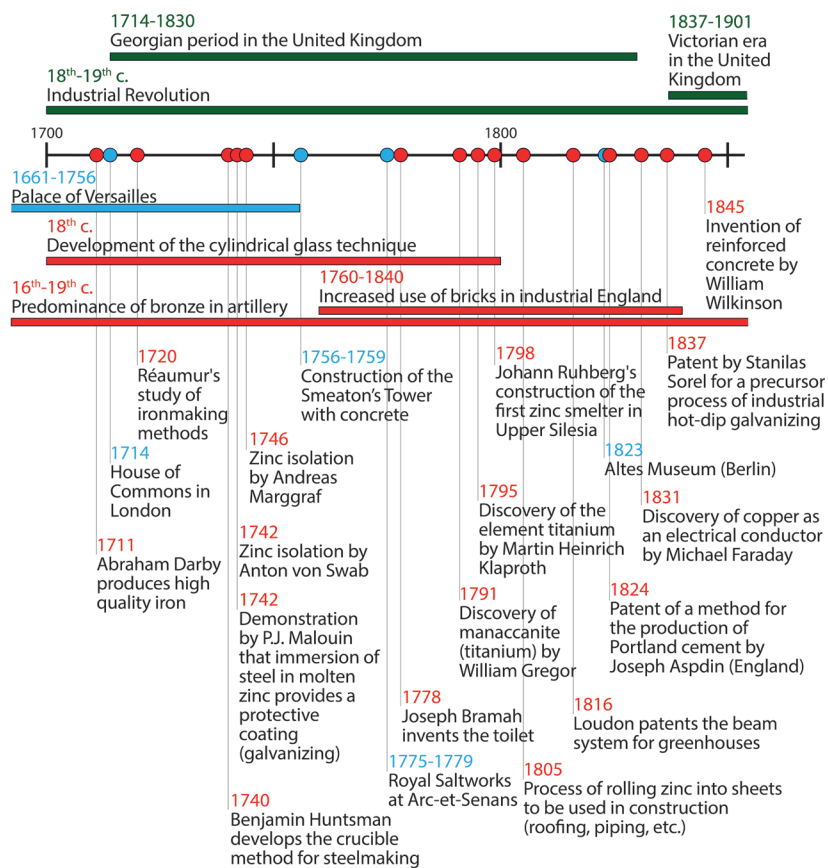


Figura A.11. En el siglo XVIII se inicia la Revolución Industrial y con ella aumenta la velocidad de los avances científicos y tecnológicos. Se empezó a desarrollar la técnica del vidrio cilíndrico y el uso de estructuras metálicas. Los descubrimientos de nuevos materiales y las patentes se sucedieron. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

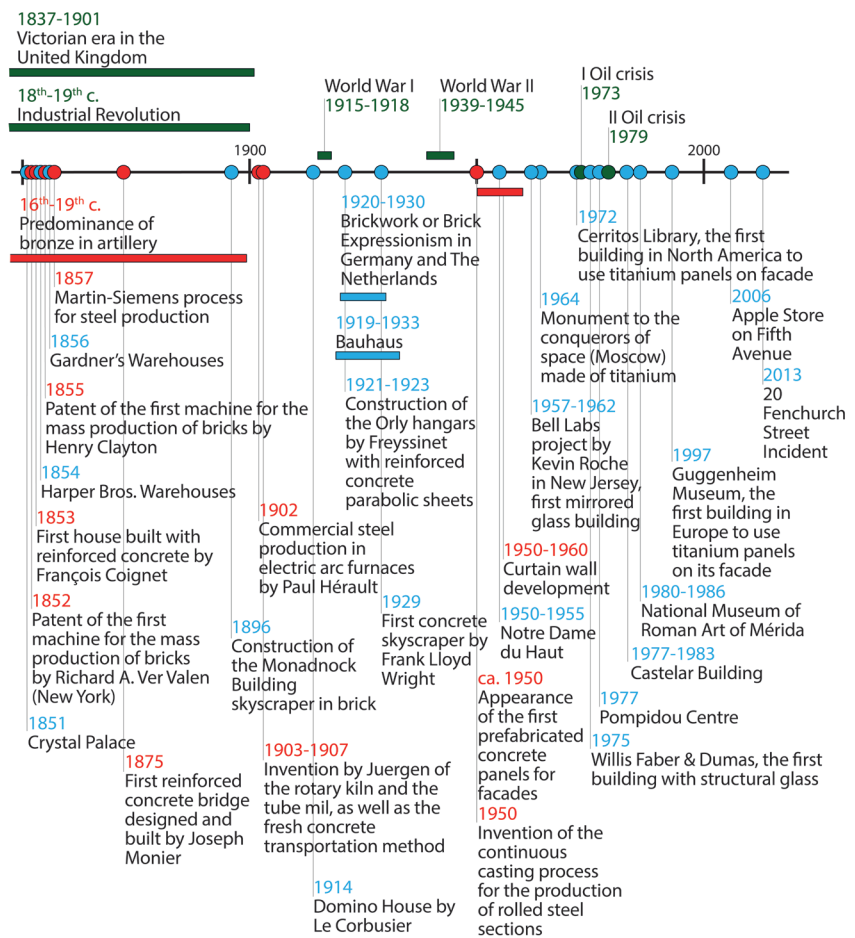


Figura A.12. Durante la segunda mitad del siglo XIX y el siglo XX, los avances tecnológicos continuaron con la misma intensidad. Las revoluciones sociales que se vivirán a lo largo del siglo XX cambiarán la concepción de las necesidades y por tanto las tipologías de los edificios, tomando gran importancia la imagen corporativa. El concepto de envolvente se asentará en esta época gracias a la libertad estructural y funcional que se dará a la fachada, apareciendo soluciones como los muros cortina o el vidrio estructural. (David Mediavilla Martín e Irene Sánchez Ramos, 2020)

Código de validación

Aquí se especifican varios ejemplos del código empleado en el capítulo 3.2. *Validación*. en la página 213.

Código general (Windows)

```

::Generamos las variables de hora y de posición
set /A mes=0
:startmes
set /A mes= %mes% +1
set /A dia=0
:startdia
set /A dia= %dia% +3
set /A hora=12
set /A ano=2010
set /A minuto=00
set latitud=45
set longitud=-15

::Creamos la luz correspondiente
gensky %mes% %dia% %hora%:%minuto% CET -y %ano% +s -a
%latitud% -o %longitud% > 01-04F0-1Luz.rad

::Creamos una escena general
oconv 01-Materiales.rad 04F-PatioCircular0-1.rad
01-04F0-1Luz.rad 01-Outside.rad > 02-04F0-1Escena.oct
echo "octree creado"

:: Creamos el render de irradiancia y pfilt
rpict -i -vf 03-Vista.vf -x 4096 -y 4096 -av .5 .5 .5
02-04F0-1Escena.oct > 04-04F0-1IIimagenMala.hdr
pfilt 04-04F0-1IIimagenMala.hdr > 04-04F0-1IIimagen%mes%-
%dia%-%hora%.hdr
echo "irradiancia creada"

::Creamos la imagen con falsecolor

```

```
falsecolor -i 04-04F0-1IIimagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr -e
-s 200000 -l %dia%/mes%-%hora%:%minuto%-Lux -lw 200 >
05-04F0-1ImagenContinua%mes%-%dia%-%hora%.hdr
echo "Imagen continua creada"

::Añadimos la fecha al txt
echo %dia% %mes% %hora% >> ValoresRAW0-1-4096.txt

::Calculamos los máximos y mínimos
pextrem -o 04-04F0-1IIimagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr >>
ValoresRAW0-1-4096.txt

::Copiamos los archivos a la carpeta creada
copy 04-04F0-1IIimagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr 04F0-1-
4096Render
copy 05-04F0-1ImagenContinua%mes%-%dia%-%hora%.hdr
04F0-1-4096Falsecolor

::Borramos los archivos que nos sobran
del 04-04F0-1IIimagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr /q
del 05-04F0-1ImagenContinua%mes%-%dia%-%hora%.hdr /q

::Hacemos bucle
if %dia% leq 29 ( goto startdia)
if %mes% leq 11 ( goto startmes) else ( pause)

exit
```

Cálculo de valores de puntos concretos (Windows)

```
::Generamos las variables de hora y de posición
set /A mes=0
:startmes
set /A mes= %mes% +1
set /A dia=0
:startdia
set /A dia= %dia% +3
set /A hora=12
set /A ano=2010
set /A minuto=00
```

```

set latitud=45
set longitud=-15
echo %mes%

::Añadimos la fecha al txt
echo %dia% %mes% %hora% >> ValoresRAW-4096-
TodosLosPuntos.txt

::Calculamos el punto 1 (1440, 3000)
pvalue -o 04-04F0-1IImagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr | rcalc
-e "eq(a,b):if(a-b+.5,b-a+.5,-1);and(a,b):if(a,b,a)"
-e "cond=and(eq($1,1440),eq($2,3000))" -e
"$1=$3;$2=$4;$3=$5" >> ValoresRAW-4096-TodosLosPuntos.
txt

::Calculamos el punto 2 (1440, 1820)
pvalue -o 04-04F0-1IImagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr | rcalc
-e "eq(a,b):if(a-b+.5,b-a+.5,-1);and(a,b):if(a,b,a)"
-e "cond=and(eq($1,1440),eq($2,1820))" -e
"$1=$3;$2=$4;$3=$5" >> ValoresRAW-4096-TodosLosPuntos.
txt

::Calculamos el punto 3 (3000, 1440)
pvalue -o 04-04F0-1IImagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr | rcalc
-e "eq(a,b):if(a-b+.5,b-a+.5,-1);and(a,b):if(a,b,a)"
-e "cond=and(eq($1,3000),eq($2,1440))" -e
"$1=$3;$2=$4;$3=$5" >> ValoresRAW-4096-TodosLosPuntos.
txt

::Calculamos el punto 4 (3000, 3000)
pvalue -o 04-04F0-1IImagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr | rcalc
-e "eq(a,b):if(a-b+.5,b-a+.5,-1);and(a,b):if(a,b,a)"
-e "cond=and(eq($1,3000),eq($2,3000))" -e
"$1=$3;$2=$4;$3=$5" >> ValoresRAW-4096-TodosLosPuntos.
txt

::Calculamos el punto 5 (3000, 3000)
pvalue -o 04-04F0-1IImagen%mes%-%dia%-%hora%.hdr | rcalc
-e "eq(a,b):if(a-b+.5,b-a+.5,-1);and(a,b):if(a,b,a)"
-e "cond=and(eq($1,1250),eq($2,1650))" -e

```

```
“$1=$3;$2=$4;$3=$5” >> ValoresRAW-4096-TodosLosPuntos.
txt

::Hacemos bucle
if %dia% leq 29 ( goto startdia)
if %mes% leq 11 ( goto startmes) else ( pause)

exit
```

Cálculo de comparativa de tiempos variando la resolución de imagen (Linux)

```
for n in 518 1024 2048 4096 8192 16384
do

    # Creamos la luz correspondiente
    srun gensky 6 21 12:00CET -y 2010 +s -a 45 -o -15 >
01A-Luz$n.rad

    # Creamos una escena general
    srun oconv 01A-Luz$n.rad 01-Outside.rad 01-Materiales.
rad 04F-PatioCircular0-1.rad > 02-Escena$n.oct
    echo “octree creado”

    inicio_ns=`date +%s%N`
    inicio=`date +%s`
    # Creamos el render
    srun rpict -i -vf 03-Vista.vf -x $n -y $n 02-Escena$.
oct > ./Render/04-IIimagen$n.hdr
    echo “irradiancia creada”
    fin_ns=`date +%s%N`
    fin=`date +%s`
    let total_ns=$fin_ns-$inicio_ns
    let total=$fin-$inicio
    echo “Render $n ha tardado: $total_ns nanosegundos,
$total segundos” >> Parametros.txt

    inicio_ns2=`date +%s%N`
    inicio2=`date +%s`
    #Creamos la imagen con falsecolor
```

```
    srun falsecolor -i ./Render/04-IIimagen$n.hdr -e
-s 200000 -l 21/6-12:00-Lux -lw 200 > ./Falsecolor/05-
ImagenContinua$n.hdr
    echo "Imagen continua creada"
    fin_ns2=`date +%s%N`
    fin2=`date +%s`
    let total_ns2=$fin_ns2-$inicio_ns2
    let total2=$fin2-$inicio2
    echo "Falsecolor $n ha tardado: -$total_ns2-
nanosegundos, -$total2- segundos" >> Parametros.txt

    inicio_ns3=`date +%s%N`
    inicio3=`date +%s`
    # Calculamos todos los valores
    srun pvalue -o -h ./Render/04-IIimagen$n.hdr >> ./
Resultados/F1Valores$n.txt
    echo pvalue hecho
    fin_ns3=`date +%s%N`
    fin3=`date +%s`
    let total_ns3=$fin_ns3-$inicio_ns3
    let total3=$fin3-$inicio3
    echo "Pvalue $n ha tardado: -$total_ns3- nanosegundos,
-$total3- segundos" >> Parametros.txt

    inicio_ns4=`date +%s%N`
    inicio4=`date +%s`
    # Calculamos los máximos y mínimos
    srun pxtrem -o ./Render/04-IIimagen$n.hdr >> ./
Resultados/F1Maximos$n.txt
    echo pxtrem hecho
    fin_ns4=`date +%s%N`
    fin4=`date +%s`
    let total_ns4=$fin_ns4-$inicio_ns4
    let total4=$fin4-$inicio4
    echo "Pxtrem $n ha tardado: -$total_ns4- nanosegundos,
-$total4- segundos" >> Parametros.txt

done
```

Definición de materiales empleados para la simulación del 20 de Fenchurch Street (rad)

```
# Edificios adyacentes
# Building material: Cement Brick 2
# Reflectance: rho=0.289
void plastic Edificios
0
0
5 0.356 0.269 0.225 0 0

#Suelo
# Building material: Shiny Black Granite
# Reflectance: rho=0.099
void plastic Suelo
0
0
5 0.101 0.098 0.103 0 0

#Fechurch
# JALOX A BS8206-2 Glazing Calculator for Radiance
# http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/bs8206_
glazing.shtml
# Version: 30 Sep 2014
# Total, dirt-corrected and framing-corrected glazing
transmittance
# after BS 8206-2:2008 and CIBSE LG10:1999
#
# Glazing transmittance (A.2) ==> 0.65
# - LG10: Double glazing low E glass + low E glass
# Maintenance factor ==> 90%
# Location and use (A.3) => 10%
# - Urban
# - Commercial, educational - rooms used by groups of
people, office equipment
# Slope and Exposure (A.4) => x 1
# - Vertical glazing
# - Normal exposure for location
# Special conditions (A.5) => x 1
# - Normal vertical glazing
```

```

# Framing (A.6) ==> x 0.8
# - Metal frame, large pane
# Total corrected transmittance ==> 0.468

void glass glazing_mat
0
0
3 0.509886 0.509886 0.509886

void mirror Walkie
1 glazing_mat
0
3 0.30 0.30 0.3075

```

Simulación Fenchurch (Linux)

```

n=1

for mes in {1..12..1}
do
  for dia in {3..30..3}
  do
    for hora in 13
    do
      for minuto in {00..40..20}
      do
        ano=2013
        huso=GMT
        latitud=51.5113
        longitud=0.0835

        # Creamos la luz correspondiente
        srun gensky $mes $dia $hora:$minuto$huso -y $ano
+s -a $latitud -o $longitud > 01A-Luz$n.rad
        # Creamos una escena general
        srun oconv 01A-Luz$n.rad 01B-Outside.
rad 01C-Materiales.rad 00A-Fenchurch180.rad
00B-Edificios180.rad 00E-suelo.rad > 02-Escena.oct
        echo "octree creado"

```

```
# Creamos el render de irradiancia
srun rpict -i -vf 03-Vista.vf -x 4096 -y 4096
02-Escena.oct > ./Render/04-IIimagen$n.hdr
echo "irradiancia creada"

#Creamos la imagen con falsecolor
srun falsecolor -i ./Render/04-IIimagen$n.hdr -m
1 -s 2000 -l $dia/$mes-$hora:$minuto-W/m2 -lw 200 > ./
Falsecolor/05-ImagenContinua$n.hdr
echo "Imagen continua creada"

# Calculamos los máximos y mínimos
srun pextrem -o ./Render/04-IIimagen$n.hdr >> ./
Resultados/Maximos.txt
srun sed '$ s/^/'$dia' '$mes' '$hora' '$minuto'
'$n' '/' ./Resultados/Maximos.txt -i
echo pvalue hecho

# Hacemos la lista de asociación fechas e índice
srun echo '$mes'-'$dia'-'$hora'-'$minuto'.txt-
>Valores'$n'.txt' >> Nombres.txt

#Sumamos 1 a n
n=$((n+1))
done
done
done
done
```

Código casos de estudio

Aquí se especifica un ejemplo del código empleado en el capítulo 4.1. *Palazzo Lombardia. Milán.* en la página 253.

Materiales (rad)

```
# Suelo
# Building material: Shiny Black Granite
# Reflectance: rho=0.099
void plastic Suelo
0
0
5 0.101 0.098 0.103 0 0

# Vidrio
# JALOXIA BS8206-2 Glazing Calculator for Radiance
# http://www.jaloxia.eu/resources/radiance/bs8206_
glazing.shtml
# Version: 30 Sep 2014
# Total, dirt-corrected and framing-corrected glazing
transmittance
# after BS 8206-2:2008 and CIBSE LG10:1999
#
# Glazing transmittance (A.2) ==> 0.65
# - LG10: Double glazing low E glass + low E glass
# Maintenance factor ==> 90%
# Location and use (A.3) => 10%
# - Urban
# - Commercial, educational - rooms used by groups of
people, office equipment
# Slope and Exposure (A.4) => x 1
# - Vertical glazing
# - Normal exposure for location
# Special conditions (A.5) => x 1
# - Normal vertical glazing
# Framing (A.6) ==> x 0.8
# - Metal frame, large pane
# Total corrected transmittance ==> 0.468

void glass glazing_mat
```

```
0
0
3 0.509886 0.509886 0.509886

void mirror Vidrio
1 glazing_mat
0
3 0.15 0.15 0.15

# Zona ciega

# Building material: Light Simplon Granite
# Reflectance: rho=0.359
void plastic Ciego
0
0
5 0.355 0.361 0.348 0 0
```

Archivo de entorno (rad)

```
# A standard sky and ground to follow
# a gensky sun and sky distribution.
#

skyfunc glow sky_glow
0
0
4 .9 .9 1.15 0

sky_glow source sky
0
0
4 0 0 1 180

skyfunc glow ground_glow
0
0
4 1.4 .9 .6 0
```

```
ground_glow source ground
0
0
4 0 0 -1 180
```

Código general (Linux)

```
n=1

for mes in {1..12..1}
do
    dia=21
    for hora in {7..19..2}
    do

        minuto=00
        ano=2010
        huso=CET
        latitud=45.487
        longitud=-9.196

        # Creamos la luz correspondiente
        srun gensky $mes $dia $hora:$minuto$huso -y $ano +s
        -a $latitud -o $longitud > 01A-Luz$n.rad
        # Creamos una escena general
        srun oconv 01A-Luz$n.rad 01B-Outside.rad
        01C-Materiales.rad 00A-vidrio.rad 00B-zonasOpacas.rad
        00E-suelo.rad > 02-Escena$n.oct
        #Creamos una escena general para el mapa de fotones
        # srun oconv 01A-Luz$n.rad 01B-Outside.rad
        01C-Materiales.rad 01D-puerto.rad 00A-vidrio.rad
        00B-zonasOpacas.rad 00E-suelo.rad > 02-EscenaPM$n.oct
        echo "octree creado"
        #Creamos el mapa de fotones
        # srun mkpmap -apg ./PM/Global$n.gpm 50k -apc ./PM/
        Caustica$n.cpm 50k -apo Puerto -t 5 02-EscenaPM$n.oct
        # Creamos el render de irradiancia y pfilt
        srun rpict -i -vf 03-parallelBueno.vf -x 2048 -y
        2048 02-Escena$n.oct > ./Render/04-IIimagen$n.hdr
        echo "irradiancia creada"
```

```
#Creamos la imagen con falsecolor
  srun falsecolor -i ./Render/04-IIimagen$n.hdr -e
-s 200000 -l $dia/$mes-$hora:$minuto-Lux -lw 200 > ./
Falsecolor/05-ImagenContinua$n.hdr
  echo "Imagen continua creada"
# Calculamos todos los valores
  srun pvalue -o -h ./Render/04-IIimagen$n.hdr >> ./
Resultados/F1Valores$n.txt
  echo pvalue hecho
# Calculamos los máximos y mínimos
  srun pxtrem -o ./Render/04-IIimagen$n.hdr >> ./
Resultados/F1Maximos.txt
  srun sed '$ s/^/'$dia' '$mes' '$hora' '$minuto' '$n'
/' ./Resultados/F1Maximos.txt -i
  echo pvalue hecho
# Hacemos la lista de asociación fechas e índice
  srun echo '$mes'-'$dia'-'$hora'-'$minuto'.txt-
>Valores'$n'.txt' >> F1Nombres.txt
  #Sumamos 1 a n
  n=$((n+1))
done
done
```


Esta tesis se terminó de escribir el día 10 de junio de 2022. Fue presentada ante una comisión de expertos propuesta por la comisión del Programa de Doctorado en Estudios Transversales de Arquitectura y Urbanismo y declarada apta para su defensa pública el día 27 de julio de 2022.
Se termina, corregida y revisada el día 3 de noviembre de 2022.