

Trabajo Fin de Grado

Iluminación Global mediante
Progressive Instant Radiosity

Ibón Guillén Serrano

Director: Adrián Jarabo Torrijos
Ponente: Dr. Diego Gutiérrez Pérez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

Progressive Instant Radiosity

Resumen

La generación de imágenes sintéticas por ordenador es una técnica fuertemente asentada hoy en día en industrias muy diversas, desde la producción cinematográfica a la arquitectura, pasando por los videojuegos y el diseño gráfico. En particular, la síntesis de imágenes fotorrealistas es un campo de trabajo que recibe enorme atención debido a la complejidad del problema, ya que requiere una simulación físicamente correcta de todas las posibles interacciones de la luz con el medio.

Los algoritmos más utilizados para abordar el problema están basados en el muestreo estocásticos de caminos lumínicos, y son capaces de aproximar el transporte de luz de una manera precisa, de modo que son capaces de generar imágenes sintéticas indistinguibles de la realidad. Sin embargo, estos algoritmos tienen un alto coste computacional y requieren tiempos de procesamiento muy largos para producir resultados libres del ruido (varianza) introducido como consecuencia de su naturaleza estocástica.

Existe una variante de estos algoritmos estocásticos que aproximan la irradiancia dentro de una escena mediante luces virtuales, denominados *instant radiosity*. Estos algoritmos presentan una convergencia considerablemente más rápida a imágenes libres de ruido, lo que ha propiciado su adopción en sectores como la industrial del cine, de los videojuegos, así como en numerosos softwares de previsualización de CAD, en detrimento de otras técnicas. No obstante, a pesar de que estas técnicas son capaces de dar resultados precisos, a menudo se les aplican aproximaciones sesgadas con el fin de evitar ciertos artefactos visuales que afectan fuertemente a la calidad visual de las imágenes producidas. De este modo, se introduce un compromiso entre la varianza y el sesgo introducido por las aproximaciones.

En este trabajo proponemos un algoritmo progresivo de naturaleza consistente, que aunque sesgado, converge en el límite a una solución sin varianza y sesgo. Para ello, estudiamos los algoritmos existentes alrededor de la idea de *many lights*, analizando la varianza que produce los indeseables artefactos visuales, y evaluando qué métodos sesgados existen para reducir dicha varianza: *clamping* y *blur* en el dominio espacial. Después, proponemos aproximaciones progresivas que reducen el sesgo en cada iteración del algoritmo, de modo que convergen a una solución sin ruido o sesgo en el límite. Investigaremos las técnicas aplicadas en otras aproximaciones sesgadas de la iluminación global basadas en transporte estocástico de partículas, y las aplicamos en el contexto de la iluminación mediante luces virtuales.

Finalmente, desarrollamos una implementación los algoritmos desarrollados y observamos su eficiencia en escenas reales, comparándolos con las técnicas preexistentes y planteando futuros caminos de trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
2. Conocimiento previo	3
2.1. Término geométrico	4
2.2. BSDF	4
2.3. Muestreo y reconstrucción	5
3. Análisis del Problema	6
3.1. Problemas de los métodos basados en luces virtuales	7
3.1.1. <i>Banding</i>	7
3.1.2. Picos de iluminación	8
3.1.3. Escalabilidad	9
3.2. Trabajo relacionado	10
4. Progressive Instant Radiosity	12
4.1. Esquema general	12
4.2. Estimadores progresivos	13
4.2.1. Clamping progresivo	13
4.2.2. VSLs con reducción progresiva del radio	13
5. Resultados	16
5.1. Detalles de implementación	16
5.2. Selección de parámetros	16
5.3. Resultados adicionales	20
6. Conclusiones	23
6.1. Discusión y Trabajo futuro	23
6.2. Conclusiones personales	24
6.3. Diagrama temporal del proyecto	24

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día existe una importante demanda de imágenes sintéticas lo más próximas posibles a la realidad, bien sea para su integración dentro de producciones audiovisuales o como medio para prototipar productos industriales antes de su manufactura. El proceso de convertir la definición matemática de una escena - en forma de geometría, modelos de materiales, cámaras y fuentes de luz - en una imagen se denomina *renderizado*. Para lograr generar imágenes fotorrealistas es necesario simular el transporte de luz en la escena de forma físicamente correcta, de modo que refleje de manera fiel el proceso de captura de la imagen por parte de un sensor real.

El transporte de luz se puede dividir en dos componentes: luz directa, que incide directamente en los objetos desde las fuentes de luz, y luz indirecta, que llega a los objetos después de haber sufrido diferentes interacciones con el medio. Es el cálculo de esta segunda componente del transporte de luz el que entraña mayor complejidad, ya que requiere simular diversas interacciones de la luz con la materia, incluyendo múltiples interreflexiones, cáusticas, transmitancia a través de medios y materiales, etc.

La forma habitual de resolver el transporte de luz consiste en el uso de técnicas de integración por Monte Carlo [Owen 2013], ya que el transporte de luz se modela como una integral multidimensional que, salvo en casos muy concretos, no se puede calcular de forma analítica. Métodos como *path tracing* [Kajiya 1986], sus variantes bidireccionales [Lafortune and Willem 1993, Veach and Guibas 1994], o *Metropolis light transport* [Veach and Guibas 1997], permiten calcular las interacciones que se producen en el transporte de luz sin sesgo, de modo que son generalmente considerados como la solución *ground truth* de las imágenes por computador. Sin embargo, estas técnicas convergen lentamente a imágenes sin ruido en escenas generales, requiriendo tiempos de renderizado muy elevados.

Photon mapping [Jensen 2001], aproxima la iluminación mediante simulación de partículas, depositando paquetes de radiancia (*fotones*) en los puntos de interacción (superficies o medios participativos) en de la escena y calculando la iluminación incidente mediante estimación de densidad. Estos métodos convergen rápidamente a una solución sin ruido, y permiten capturar de forma robusta la mayoría de caminos lumínicos, a costa de introducir sesgo en el resultado como consecuencia del kernel usado en la estimación de densidad. Las variantes progresivas [Hachisuka et al. 2008, Hachisuka and Jensen 2009, Knaus and Zwicker 2011] de *photon mapping* lidian con el sesgo inherente a la técnica haciendo múltiples pasadas de estimación de densidad, reduciendo progresivamente el sesgo en cada iteración. De este modo, estos algoritmos son sesgados pero consistentes (es decir, convergen a una solución sin sesgo en el límite).

En la intersección de estos métodos, surgen las técnicas basadas en luces virtuales, o *instant radiosity* [Keller 1997]. Estas técnicas aproximan el transporte de luz como la iluminación directa proveniente de un conjunto de luces virtuales generadas de manera análoga a *photon mapping* mediante trazado estocástico de partículas, ofreciendo una infraestructura sencilla que permite evaluar la mayoría de caminos lumínicos. La ventaja de estos métodos es que exhiben una buena convergencia, ofreciendo soluciones rápidas con baja varianza sin la introducción de sesgo derivado de los estimadores usados en *photon mapping*. Su rápida convergencia, y lo simple de su implementación, ha hecho que estos algoritmos hayan sido ampliamente estudiados tanto en aplicaciones *off-line*, incluyendo algoritmos escalables con millones de luces virtuales usados en producción [Walter et al. 2005; 2006; 2012, Christensen 2008] como en aplicaciones en tiempo real [Ritschel et al. 2009; 2011]. Además su aproximación de la irradiancia mediante luces virtuales permite que puedan ser fácilmente integrados dentro del esquema de rasterización usados por las GPUs [Dachsbacher and Stamminger 2005].

Sin embargo, debido a la aproximación de la luz indirecta mediante un conjunto de luces virtuales, estos métodos introducen una serie de artefactos visuales claramente perceptibles [Křivánek et al. 2010], que afectan negativamente de forma significativa el resultado final. Entre esos artefactos destacan el las singularidades de radiancia o el *banding*. Numerosas técnicas se han propuesto para reducir estos artefactos de forma eficiente (ver Sección 3.2), a costa de introducir sesgo en la solución final, o limitar el rango de aplicación del método sólo a escenas difusas.

Basándonos en las aproximaciones progresivas de *photon mapping*, en este trabajo formulamos *instant radiosity* como un algoritmo progresivo, reduciendo notablemente la varianza que causa los artefactos visuales mediante la introducción de sesgo, que en el límite converge a una solución consistente. Con este fin, analizamos las principales fuentes de varianza del algoritmo, y proponemos una formulación progresiva que incorpora los dos métodos más comunes de eliminación de artefactos en *instant radiosity*, *clamping* [Keller 1997] y *blur* en el dominio espacial [Hašan et al. 2009].

En particular, nuestras contribuciones son:

- Análisis de los distintos tipos de artefactos producidos por instant radiosity.
- Formulación progresiva del *clamping* introducido en *instant radiosity* para eliminar los artefactos visuales debidos a las singularidades.
- Formulación progresiva del algoritmo Virtual Spherical Lights (VSLs) [Hašan et al. 2009], de modo que permita la simulación robusta de caminos glossy sin artefactos visibles, y a la vez converja a una solución sin sesgo en el límite.
- Implementación de ambas formulaciones en el trazador de rayos basado en física PBRT [Pharr and Humphreys 2010], y análisis y comparación de ambas técnicas.

Capítulo 2

Conocimiento previo

El proceso de renderizado funciona de manera análoga a la fotografía. Las imágenes se generan calculando la radiancia incidente en un sensor virtual desde una escena, para lo cual es necesario calcular las interacciones que la luz experimenta en el medio físico desde que es emitida por las fuentes de luz hasta que llega al sensor. La aproximación con el que vamos a trabajar en este trabajo para abordar este problema se denomina **ray tracing** [Whitted 1980], la cual consiste en modelar mediante rayos todos los caminos que la luz puede seguir a través de la escena hasta el sensor, y medir la contribución de cada uno de ellos a la imagen final.

El transporte de luz a través de la escena mediante *ray tracing* se puede modelar con la *path integral* [Veach 1998], que mide la luz incidente I en el sensor como

$$I = \int_{\Omega} f(\bar{x}) d\mu(\bar{x}), \quad (2.1)$$

donde I es la energía incidente en un píxel del sensor; $\Omega = \Omega(\mathcal{M})$ el conjunto de todos los caminos \bar{x} que contribuyen a la imagen, y que van desde una fuente de luz en la escena hasta el sensor, $\mu(\bar{x})$ el diferencial de área del camino, y $f(\bar{x})$ es la contribución del camino \bar{x} . Cada uno de los caminos lumínicos \bar{x} , está formado por un conjunto de vértices que pertenecen al manifold \mathcal{M} de la escena, de la forma

$$\bar{x} = x_0 \ x_1 \ \dots \ x_k \quad (2.2)$$

donde el vértice x_0 está en un fuente de luz y x_k sobre el sensor. Un ejemplo de un camino lumínico de $k = 3$ puede verse en la Figura 2.3.

La contribución $f(\bar{x})$ de un camino lumínico \bar{x} se calcula teniendo en cuenta las interacciones de la luz con el medio en los vértices $x_1 \dots x_{k-1}$,

$$f(\bar{x}) = L_e(x_0)G(x_0 \leftrightarrow x_1) \left[\prod_{i=1}^{k-1} \rho(x_i)G(x_i \leftrightarrow x_{i+1}) \right] W_e(x_k) \quad (2.3)$$

donde $L_e(x_0)$ es la radiancia emitida por la fuente de luz, $G(x_i \leftrightarrow x_j)$ es el término geométrico entre dos puntos (ver Sección 2.1), $\rho(x_i)$ es la es la BSDF que modela cómo la luz es reflejada en cada vértice x_i ver Sección 2.2); $W_e(x_k) = W_e(x_{k-1} \rightarrow x_k)$ es la respuesta del sensor ante la radiancia incidente.

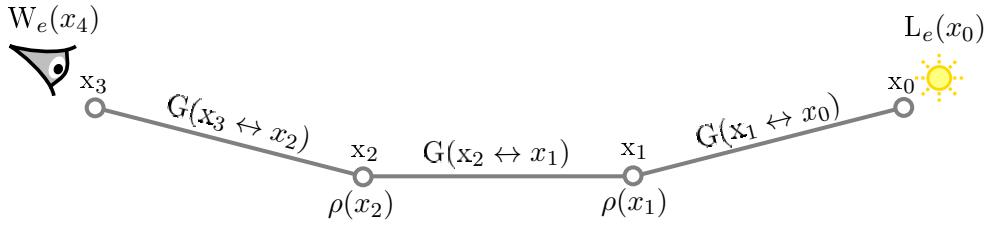


Figura 2.1: Camino lumínico modelado por la path integral. La luz interactúa en varios puntos de la escena, donde sufre eventos de dispersión, desde que parte de la fuente de luz en x_0 hasta que llega al sensor x_3

2.1. Término geométrico

El término geométrico $G(x_i \leftrightarrow x_j)$ entre dos vértices x_i y x_j , modela la atenuación sufrida por la luz debido a la distancia y a la proyección de la luz incidente sobre el diferencial de área de la superficie. Está definido como

$$G(x_i \leftrightarrow x_j) = V(x_i \leftrightarrow x_j) \frac{|\cos \theta_{i,j}||\cos \theta_{j,i}|}{\|x_i - x_j\|^2}, \quad (2.4)$$

donde $V(x_i \leftrightarrow x_j)$ es la función de visibilidad entre los puntos x_i y x_j . $\theta_{i,j}$ y $\theta_{j,i}$ son los ángulos entre el segmento que une ambos puntos y las normales en los puntos de superficie.

2.2. BSDF

La función bidireccional de distribución de la dispersión o *BSDF* (por sus siglas en inglés, *Bidirectional Scattering Distribution Function*), relaciona la radiancia entrante y saliente en un punto de la superficie en función de las direcciones de entrada y salida del camino lumínico. Estas funciones modelan cómo refleja (o transmite) la luz una superficie, definiendo la apariencia de la misma. Para ser físicamente correctas, las BSDF deben cumplir el principio de conservación de la energía, es decir, la energía saliente en un punto debe ser igual o menos que la incidente.

En función de como distribuyen la energía hablamos de BSDF difusas, cuando la energía es distribuida uniformemente en todas las direcciones, o especulares, cuando la energía se concentra alrededor de la dirección de salida. El comportamiento de los distintos tipos de BSDF puede observarse en la Figura 2.2.

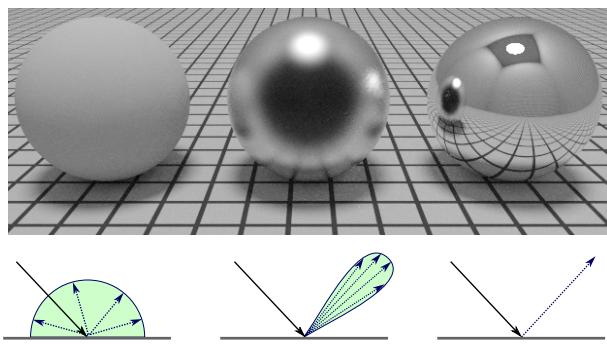


Figura 2.2: BSDFs modelando diferentes materiales: Difuso puro o Lambertiano (Izquierda), brillante o *glossy* (Centro) y especular perfecto (Derecha).

2.3. Muestreo y reconstrucción

Resolver analíticamente la *path integral* no es posible salvo en conjuntos muy limitados de escenas, debido a la complejidad de las funciones que definen la geometría y materiales de la escena, así como su naturaleza recursiva. En su lugar, esta integral se resuelve comúnmente utilizando integración estocástica por Monte Carlo [Owen 2013], que es una técnica muy apropiada para aproximar integrales en espacios con alta dimensionalidad (o potencialmente infinita). Así pues, la contribución I en un píxel se approxima como:

$$I = \int_{\Omega} f(\bar{x}) d\mu(\bar{x}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(\bar{x}_i)}{p(\bar{x}_i)}, \quad (2.5)$$

La pdf $p(\bar{x})$ de un camino lumínico es la probabilidad conjunta de los vértices individuales que lo conforman, $\bar{x} = x_0 \ x_1 \dots \ x_k$, por lo que viene dado por el producto de sus pdfs condicionales

$$p(\bar{x}) = p(x_0|x_1|\dots|x_k) = p(x_0)p(x_1)\dots p(x_k), \quad (2.6)$$

Esta pdf conjunta depende del método usado para muestrear caminos lumínicos, de modo que diversas técnicas de muestreo pueden ser empleadas y combinadas a fin de reducir la varianza en la solución.

Se puede ver fácilmente que los caminos pueden ser trazados tanto desde el observador a la fuente de luz, así como unirlos entre sí de manera determinista, mediante lo que comúnmente se denomina un *rayo de sombra*, sin que esto introduzca sesgo al resultado final del integrador. Gracias a esta propiedad se han desarrollado distintas técnicas de renderizado que muestran los caminos lumínicos desde la fuente al sensor como *light tracing* [Dutré et al. 1993], desde el sensor a la fuente como *path tracing* [Kajiya 1986], o combinaciones de ambas que unen caminos trazados desde la fuente y desde el sensor como *bidirectional path tracing* [Lafortune and Willems 1993, Veach and Guibas 1994]. En la Figura 2.3 pueden observarse ejemplos de estas tres variantes.

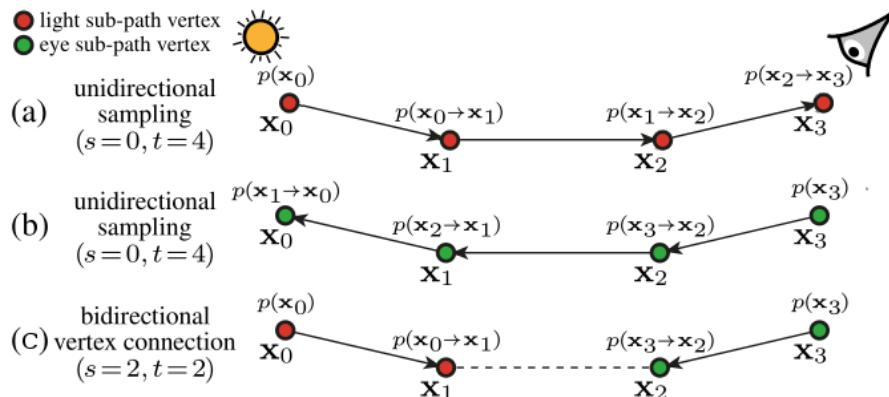


Figura 2.3: Comparación en el muestreo de caminos lumínicos entre *light tracing* (a), *path tracing* (b) y *bidirectional path tracing* (c). Nótese que en esta última los sub-caminos desde la cámara y la luz se unen de forma determinista mediante un rayo de sombra.

(Fuente [Georgiev et al. 2012])

Capítulo 3

Análisis del Problema

Instant radiosity [Keller 1997] aproxima la luz indirecta de una escena mediante luces virtuales que simulen la radiancia reflejada por cada una de las superficies. Dichas luces virtuales se generan mediante trazado de partículas estocástico, partiendo de las fuentes de luz y creando una luz virtual en cada una de las interacciones de las partículas de luz con el medio. Al calcular la iluminación sobre puntos de la escena en la fase de renderizado, cada una de estas luces virtuales se evalúa como si fuera una luz puntual que emite con una potencia igual a la radiancia depositada por el camino a partir del cual se generó. La Figura 3.1 refleja este proceso.

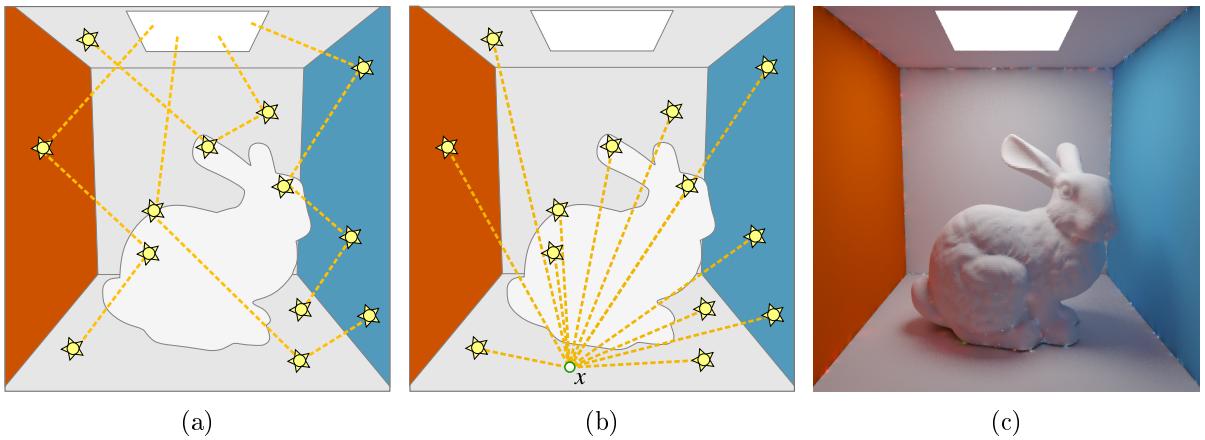


Figura 3.1: En una primera fase (a), las luces virtuales son generadas mediante el trazado de partículas desde las fuentes de luz de la escena; en cada interacción con la materia las VPLs son generadas, simulando la irradiancia de la superficie. En la etapa de renderizado (b), la radiancia en cada punto de la escena x se calcula mediante la evaluación de la iluminación desde las luces virtuales sobre el punto. (c) Imagen renderizada utilizando ≈ 2000 luces virtuales.

Dado un punto x de la escena, la radiancia que llega al mismo es la suma de la contribución de todas las luces virtuales generadas, de la forma:

$$L(x) = \sum_{j=1}^M \Phi_j \rho(p_j) V(p_j \leftrightarrow x) G(p_j \leftrightarrow x) \rho(x) \quad (3.1)$$

donde p_j es el punto de superficie en el cual se encuentra al luz virtual; Φ_j la radiancia depositada por el camino que generó la luz puntual; $\rho(p_j)$ y $\rho(x)$ respectivamente la BSDF de

la superficie donde se encuentra la luz virtual y la BSDF del punto evaluado; $V(p_j \leftrightarrow x)$ la visibilidad entre los puntos p_j y x y $G(p_j \leftrightarrow x)$ es el término geométrico entre ambos puntos.

Este renderizado mediante luces virtuales puntuales es una variación de *bidirectional path tracing* [Lafortune and Willem 1993], que en vez de unir uno a uno los caminos trazados desde las fuentes de luz y los trazados desde el observador, reutiliza todos los caminos desde las fuentes para cada uno de los caminos del observador. Evaluar cada una de las luces virtuales (Ecuación 3.1) es la unión del final de una camino lumínico de cámara con el camino de fuente que generó dicha luz virtual, tal y como puede apreciarse en la Figura 3.2.

Esta reutilización de caminos es, junto a la correlación entre las muestras de cámara que se produce como resultado de la misma [Ramamoorthi et al. 2012], la razón por la que *instant radiosity* converge más rápidamente a soluciones con baja varianza que otros métodos bidireccionales.

Sin embargo, esta correlación provoca que la varianza de la integración por Monte Carlo se manifieste de forma estructurada, causando artefactos fácilmente perceptibles que degradan la calidad de las imágenes obtenidas [Křivánek et al. 2010]. Sobre los distintos tipos de artefactos visuales que aparecen y la causa de los mismos nos extenderemos en la Sección 3.1.

3.1. Problemas de los métodos basados en luces virtuales

La correlación entre las muestras de cámara en los métodos basados en *instant radiosity* causa que la varianza introducida por la integración por Monte Carlo, se manifieste de forma mucha más estructurada. De este modo, mientras que la varianza de *bidirectional path tracing* [Lafortune and Willem 1993, Veach and Guibas 1994] se muestra en forma de ruido de alta frecuencia, en los métodos basados en luces virtuales se muestra en forma de fuertes discontinuidades en la señal (*banding*, Sec. 3.1.1), así como picos en la iluminación (*splots*, Sección 3.1.2), que son más fácilmente perceptibles para el ojo humano que el ruido de alta frecuencia. Aunque estos problemas se pueden mitigar generando más luces virtuales, el coste del algoritmo aumenta linealmente con el número de luces virtuales generadas, y en escenas de gran complejidad geométrica o material millones de estas luces son necesarias para obtener buenos resultados.

En el resto de la presente sección discutimos los problemas introducidos por el método, y revisamos brevemente el trabajo relacionado. Después, en la Sección 4, describiremos cómo resolvemos estos problemas mediante la introducción de sesgo, y cómo formulamos nuestro algoritmo para que sea consistente en el límite.

3.1.1. *Banding*

Las luces virtuales aproximan la radiancia reflejada por toda una superficie mediante varios focos de emisión puntuales sobre la superficie de la misma. Esta discretización de la radiancia puede provocar que, en presencia de objetos ocluyentes como el ilustrado en la Figura 3.3a, las discontinuidades en la radiancia incidente en otras superficies se vuelvan muy pronunciadas.

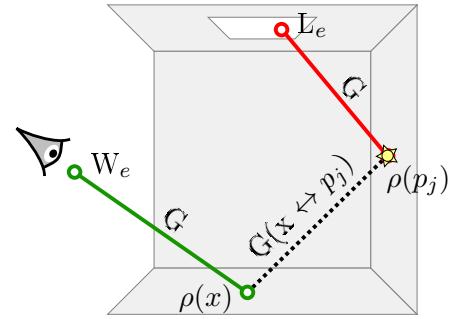


Figura 3.2: Un camino desde el observador (en verde) es unido con un camino desde la fuente (en rojo) mediante la evaluación de la luz virtual puntual.

Estas abruptas discontinuidades en la radiancia recibida por una superficie se manifiestan en forma de las características bandas de color que pueden apreciarse en la Figura 3.3b, las cuales afectan considerablemente a la calidad de la imagen. El impacto visual del banding se ve muy mitigado conforme aumenta el número de luces virtuales usadas, ya que al crecer el número de luces puntuales que aproximan la radiancia emitida por una superficie la emisión se vuelve más continua, haciendo que las discontinuidades introducidas por objetos oclusores se suavicen.

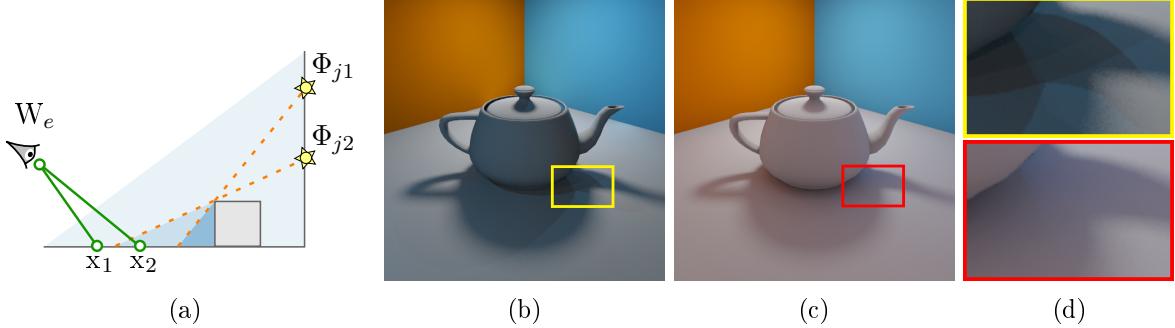


Figura 3.3: La presencia de objetos oclusores puede provocar que la diferencia entre la radiancia recibida entre dos puntos de la misma superficie sea muy pronunciada (a). Con pocas luces virtuales (≈ 50) (b), las discontinuidades en la radiancia son claramente visibles en zonas de penumbra, donde la mayor parte de las superficies se encuentran parcialmente ocluidas (d sup.). Usando un número suficientemente alto de luces virtuales (≈ 3000) (c), el efecto del *banding* resulta imperceptible (d inf.).

3.1.2. Picos de iluminación

El trazado estocástico de caminos desde las fuentes de luz puede provocar que se generen luces virtuales correspondientes a caminos lumínicos con baja probabilidad. Debido a la conexión determinista entre muestras de cámara y luces virtuales, ilustrada en la figura 3.2, la contribución de estas luces virtuales puede ser lo bastante elevada para causar que ciertas zonas de la imagen parezcan más brillantes de lo que son en realidad. Los términos de responsables de que la contribución de una luz virtual (Ecuación 3.1) sea muy elevada bajo ciertas circunstancias son el término geométrico $G(x \leftrightarrow y)$ y las BSDFs $\rho(p_j)$ y $\rho(x)$ cuando tienen una importante componente especular.

Evaluar el **término geométrico** implica dividir por la distancia al cuadrado entre los dos vértices del camino (Ecuación 2.4). Como consecuencia, cuando los dos puntos evaluados están muy próximos entre si, la contribución del término geométrico tiende a infinito. Esto provoca que las luces virtuales tengan una contribución muy elevada en la proximidad de las mismas.

Este tipo de artefactos se sitúan en zonas muy localizadas de la escena, ya que sólo aparecen dos superficies se encuentran lo suficientemente próximas entre sí. Objetos con geometría cóncava, esquinas o uniones entre distintos objetos son especialmente proclives a la aparición de estas singularidades (ver Figura 3.4). Nótese que estas singularidades también aparecen en otros métodos estocásticos (p.ej. *bidirectional path tracing*) en los que hay, igualmente, uniones deterministas entre los subcaminos de luz y cámara. Sin embargo, debido a que en estos métodos no hay correlación entre los rayos de cámara (ya que los caminos de luz no se comparten entre píxeles), estos artefactos se ven ruido de alta frecuencia (*fireflies*), y son menos perceptibles que las singularidades en *instant radiosity*.

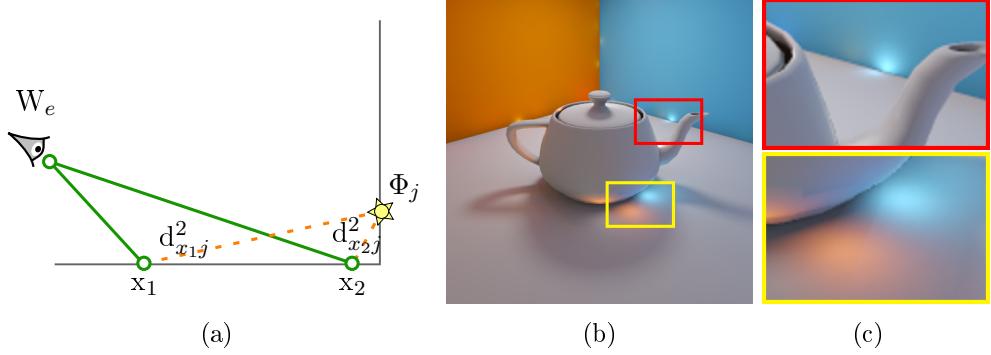


Figura 3.4: Aunque la radiancia reflejada por una superficie sea uniforme, los puntos situados en la proximidad de una luz virtual reciben considerablemente más energía debido a la evaluación del término geométrico (a). Como consecuencia la imagen presenta picos de varianza claramente perceptibles (b), especialmente notables cerca de las esquinas o en las uniones entre objetos (c).

Como se ha tratado en la Sección 2.2, las **BSDFs especulares** reflejan la radiancia recibida concentrada dentro un lóbulo de emisión orientado según el ángulo de incidencia. Cuando las luces virtuales son depositadas sobre este tipo de superficies, toda la luz emitida se concentra en el lóbulo de la BSDF, provocando picos de iluminación en los puntos de superficie situados dentro del mismo. Al contrario que las singularidades introducidos por la evaluación del término geométrico, las causados por la evaluación de la BSDF no están localizados y pueden aparecer en cualquier parte de la escena que reciba irradiancia de una superficie moderadamente specular. De forma análoga, los puntos situados sobre superficies especulares sólo reciben irradiancia de las luces virtuales que se encuentran dentro del lóbulo de la BSDF, introduciendo fuertes discontinuidades.

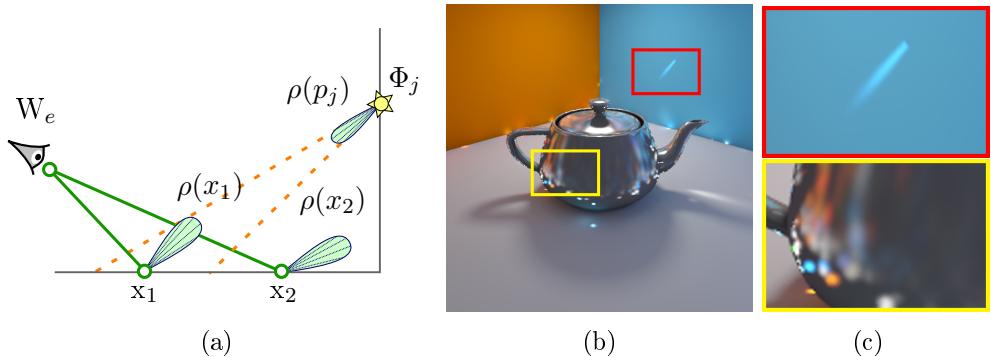


Figura 3.5: Una luz virtual generada sobre una superficie especular tiene un cono de emisión limitado, provocando que la radiancia reflejada se concentre en un área reducida (a). Esto provoca la aparición de picos de iluminación (b) no necesariamente locales (c sup.) y que afectan considerablemente a la apariencia de los materiales metálicos (c inf.).

3.1.3. Escalabilidad

La formulación original de *instant radiosity* requiere evaluar todas las N luces virtuales generadas para cada de las M muestra tomada desde la cámara, haciendo que el coste asintótico del algoritmo sea $O(N * M)$. Este coste lineal en el número de luces y muestras provoca que el algoritmo no escala bien en determinados escenarios. Por ejemplo, en escenas abiertas de gran

escala, el número de luces virtuales requeridas para obtener un resultado visualmente aceptable puede ser del orden de millones, resultando en un tiempo de renderizado considerable. Sintetizar ciertos efectos visuales como el desenfoque por profundidad de campo o causado por movimiento en escenas animadas requiere un gran número de muestras de cámara aún en escenas sencillas, reduciendo significativamente la eficiencia del algoritmo aunque el número de luces virtuales necesarias sea relativamente reducido.

Hay que denotar que los problemas de escalabilidad se dan en todos los algoritmos no sesgados que lidian con iluminación, no es algo inherente de *instant radiosity* y no viene causado por la varianza estructurada de la técnica. Por ello, pese a que el coste asintótico del algoritmo es un importante problema a considerar, no es un aspecto que vayamos a tratar en el presente trabajo.

3.2. Trabajo relacionado

Las atractivas características de *instant radiosity* han propiciado que se hayan desarrollado una gran cantidad de técnicas derivadas [Dachsbacher et al. 2014], que buscan aumentar la eficiencia de la técnica original y extender su aplicación a aspectos de la iluminación global que no eran recogidos por el planteamiento original.

En su formulación original, Keller [1997] propone un simple esquema para reducir el impacto visual de los artefactos visuales provocados por los picos de iluminación (descritos en la Sección 3.1.1) mediante **clamping**, poniendo una cota máxima a la aportación del término geométrico y la BSDF a la evaluación de la luz virtual. Si bien esta aproximación consigue reducir el impacto visual de las singularidades causadas por los términos acotados, para ello elimina radiancia de la escena, introduciendo sesgo en el resultado. Los picos de radiancia son reemplazados por un oscurecimiento de las zonas de la escena propicias a sufrir dichas singularidades. En trabajos posteriores [Kollig and Keller 2004] se propone **compensar la pérdida de iluminación** causada por el *clamping* mediante la aplicación selectiva de *path tracing* en las zonas afectadas. Sin embargo, este método reduce considerablemente la eficiencia de *instant radiosity*, en especial en presencia de superficies especulares, reintroduciendo ruido y llegando a ralentizar la convergencia del algoritmo hasta los niveles de *path tracing* puro. Un esquema similar se ha planteado para el espacio de pantalla [Novák et al. 2011], pero esta aproximación no puede recuperar energía contribuida por superficies ocultas al observador. Nuestra técnica incluye un integrador progresivo basado en esta aproximación, sobre el que hablamos en detalle en la Sección 4.2.1.

Hašan et al. [2009] abordan los picos de iluminación reemplazando la evaluación punto a punto de las luces virtuales por una integración sobre un ángulo sólido no nulo, expandiendo las luces virtuales puntuales en **luces virtuales esféricas**. Si bien este enfoque logra no sólo reducir el impacto de los picos de iluminación, sino además facilita la evaluación de luces virtuales con un lóbulo de emisión muy espectral, el resultado es sesgado ya que la se asume que la radiancia emitida por cada luz virtual es igual dentro del radio de la luz esférica. Para recuperar parte de los detalles de iluminación perdidos debido al blur de la radiancia, Davidović et al. [2010] proponen combinar la iluminación global mediante luces esféricas con luces puntuales locales, pero siguen teniendo que clamar la contribución de las luces locales para evitar la reintroducción de picos de iluminación. Las luces esféricas son la base de un integrador progresivo, del que hablamos en detalle en la Sección 4.2.2.

Lightcuts [Walter et al. 2005] mejora considerablemente la eficiencia de *instant radiosity* agrupando las luces virtuales en clústeres dentro de un árbol de búsqueda. Para cada muestra de cámara, se usa el árbol para encontrar el subconjunto de luces virtuales más relevante para

dicha muestra en vez de evaluar todo el conjunto de luces virtuales generadas. De esta manera se incrementa de forma considerable al eficiencia del algoritmo. La técnica se ha extendido para evaluar la contribución del árbol de búsqueda sobre una caché de muestras de cámara [Walter et al. 2006] y sobre caminos completos [Walter et al. 2012] en vez de muestras puntuales. Otras aproximaciones realizan clustering bidireccional de muestras de cámara y luces virtuales [Buisán 2014] para reducir el número de cálculos necesarios.

Segovia et al. [2006; 2007] mejoran la distribución de las luces virtuales generadas durante el trazado de partículas mediante la introducción de estimadores **bidireccionales**. Bajo este nuevo esquema, las luces virtuales se generan teniendo en cuenta su aportación a la imagen final, obteniendo mejores resultados con un número más reducido de luces virtuales y permitiendo muestrear de forma más eficiente caminos difíciles desde la fuente de luz.

La extensión de *instant radiosity* a **medios participativos** también ha sido abordada mediante la generación de luces virtuales dentro del medio que aproximan la difusión de la luz [Raab et al. 2008]. Para evitar la aparición de singularidades dentro del medio, Novák et al. [2012b;a] proponen sustituir las luces virtuales puntuales por rayos de luz virtuales a lo largo de todo el medio participativo. Engelhardt et al. [2012] extiende el planteamiento de compensación de *clamping* en superficies a medios participativos.

Debido a su aproximación de la iluminación global mediante la integración de luz directa de un enorme número de luces, *instant radiosity* es un método especialmente apto para su integración dentro de una **GPU**. Keller [1997] ya usó esta aproximación en su trabajo original, y posteriores trabajos buscar plantear el muestreo de una manera abordable dentro de las limitaciones de memoria de una GPU [Hašan et al. 2007], o acelerar el cálculo de la visibilidad mediante técnicas más escalables de *shadow mapping* [Ritschel et al. 2008; 2011].

Por último, las técnicas de *photon mapping* [Jensen 2001] usan el trazado estocástico de partículas para aproximar la luz indirecta de una escena de manera análoga a *instant radiosity*, pero realizando la unión entre caminos de cámara y caminos de fuente de luz mediante estimación de densidad en vez de rayos de sombra. El kernel usado para la estimación de densidad provoca que esta aproximación de la irradiancia presente cierto sesgo, lo cual ha propiciado la introducción de estimadores progresivos [Hachisuka et al. 2008, Hachisuka and Jensen 2009, Knaus and Zwicker 2011, Jarabo et al. 2014] para reducir el error introducido y que la técnica converga a un resultado consistente. Esta aproximación puede extenderse a diversas de las variantes sesgadas de *many lights*, compaginando sus atractivas propiedades de reducción de la varianza con la convergencia a un resultado no sesgado. Esta idea se extiende en el Capítulo 4.

Capítulo 4

Progressive Instant Radiosity

Hasta ahora hemos descrito el algoritmo original de *instant radiosity* [Keller 1997] y analizado los mayores focos de artefactos visuales que sufre (Sección 3.1). También hemos estudiado los métodos que se han desarrollado para hacer frente a las deficiencias del algoritmo (Sección 3.2), explicando como dichos algoritmos buscan un equilibrio entre varianza y sesgo en el resultado final.

En esta sección propondremos una técnica, fácilmente integrable en otras aproximaciones, que busca reducir drásticamente los artefactos visuales al mismo tiempo que mantiene la naturaleza consistente de la técnica original. Para ello aplicaremos integradores progresivos, siguiendo las ideas de *progressive photon mapping* [Hachisuka et al. 2008, Knaus and Zwicker 2011], sobre algunas técnicas sesgadas que se emplean habitualmente para reducir los artefactos visuales de *instant radiosity*.

4.1. Esquema general

Instant radiosity es un algoritmo en dos fases. Una de preproceso en la que se generan las luces virtuales mediante trazado de partículas estocástico, y una de renderizado en la que se toman muestras desde la cámara y se calcula la aportación de cada luz virtual sobre las mismas. Las técnicas sesgadas tratadas en este trabajo sólo introducen sesgo en la fase de renderizado, de manera análoga a como la fase de estimación de densidad es el origen del sesgo de *photon mapping* [Jensen 2001].

Nuestra propuesta es reformular el algoritmo como un método con un número arbitrario de iteraciones, en el que se alternan fases de trazado de luces virtuales con fases de renderizado. En cada fase de renderizado vamos a aplicar alguno de los esquemas de reducción de varianza existentes vistos en la Sección 3.2, reduciendo su efecto progresivamente con el número de iteraciones. De este modo, tras cada iteración obtenemos un solución parcial en la que la varianza aumenta levemente, mientras que el sesgo es reducido. A continuación el resultado de cada iteración se media con el resultado de las iteraciones previas. Esto asegura que, si el error en cada iteración es finito, entonces tanto varianza como sesgo desaparecen en el límite.

Puede observarse que nuestra formulación progresiva no incrementa el coste asintótico del algoritmo original, este sigue siendo de $O(N * M)$, donde N es el número de luces virtuales generadas y M el número de muestras de cámara o iteraciones (generalmente no es necesario tomar más de una muestra de cámara por iteración).

4.2. Estimadores progresivos

Nuestro estudio se centra sobre dos técnicas habitualmente empleadas para reducir el impacto visual de ciertos artefactos visuales que sufre *instant radiosity*, en especial los picos de iluminación descritos en la Sección 3.1.2 de este trabajo. Dichas técnicas son el *clamping* [Keller 1997, Kollig and Keller 2004, Novák et al. 2011, Engelhardt et al. 2012] de la contribución de ciertos términos y el uso de luces virtuales esféricas [Hašan et al. 2009, Davidovič et al. 2010]. Para cada una de ellas analizaremos sus fuentes de sesgo y propondremos un sencillo esquema de reducción del mismo dentro del planteamiento progresivo de *instant radiosity*.

4.2.1. Clamping progresivo

Como ya se introdujo en la Sección 3.1.2, la iluminación mediante luces virtuales sufre de picos de iluminación localizados en las esquinas y en geometrías cóncavas como consecuencia de la evaluación del término geométrico. Aplicar *clamping* permite reducir este tipo de singularidades limitando la aportación del término geométrico a una cota máxima b :

$$G'(x \leftrightarrow y) = \min(G(x \leftrightarrow y), b) \quad (4.1)$$

Esta aproximación provoca la pérdida localizada de radiancia en las zonas propicias a sufrir picos de iluminación, lo cual introduce error en la imagen final que no desaparece por muchas luces virtuales que se empleen durante el renderizado. Dentro de nuestro esquema progresivo, proponemos que en cada iteración la cota máxima b_i se incremente siguiendo el esquema propuesto por Georgiev et al. [2012] para *progressive photon mapping*:

$$b_i = b_1 * i^\alpha, \quad (4.2)$$

siendo b_1 la cota de *clamping* inicial y α el factor que regula cuánto dejamos aumentar la varianza en cada iteración. Un estudio detallado sobre la selección óptima de ambos parámetros puede encontrarse en la Sección 5.2.

Este esquema de reducción tiene la ventaja frente al planteado por Knaus and Zwicker [2011] de simplificar el cálculo de la cota máxima para una iteración dada, manteniendo el mismo comportamiento asintótico.

Bajo estas restricciones, la varianza introducida por el término geométrico aumenta ligeramente cada iteración, al mismo tiempo que se reduce el sesgo producido por la eliminación de radiancia en cada iteración. De esta forma, *instant radiosity* puede converger a un resultado consistente sin que aparezcan los característicos picos de radiancia, como puede apreciarse en la Figura 5.5.

4.2.2. VSLs con reducción progresiva del radio

Además de debido al término geométrico, los picos de iluminación en *instant radiosity* pueden ser originados por la evaluación de la BSDF en superficies con una alta componente especular. Estas singularidades no son eliminadas mediante el *clamping* del término geométrico (aunque algunas formulaciones del *clamping* [Walter et al. 2012] incluyen imponer una cota máxima a la BSDF), y aplicar una cota máxima sobre la contribución de la BSDF puede llevar a eliminar radiancia de manera no localizada en zonas no afectadas por picos de iluminación, reduciendo considerablemente la calidad visual del resultado [Křivánek et al. 2010].

Para lidiar con esta clase de artefactos, usamos la aproximación mediante luces virtuales esféricas [Hašan et al. 2009]. Bajo este marco, se asume que la irradiancia de la luz virtual se emite con igual intensidad dentro de un cierto radio en la superficie donde se encuentra la luz virtual (Figura 4.1). Esto permite evaluar la aportación de la luz virtual integrando sobre un ángulo sólido no nulo, evitando la evaluación punto a punto del término geométrico y la BSDF.

La evaluación de cada luz virtual (originalmente la Ecuación 3.1), considerada como una luz esférica de radio r queda de la forma:

$$L_j(x, \vec{\omega}_o) = \frac{\Phi_j}{\pi r^2} V(x \leftrightarrow p_j) \int_{\Omega_j} \rho(x, \vec{l}, \vec{\omega}_o) \cos(\vec{n}_x, \vec{l}) \rho(p_j, \vec{i}_j, \vec{-l}) \cos(\vec{n}_{p_j}, \vec{-l}) d\Omega \quad (4.3)$$

donde Ω_j es el cono de direcciones desde el punto x hacia la esfera de radio r centrada en p_j .

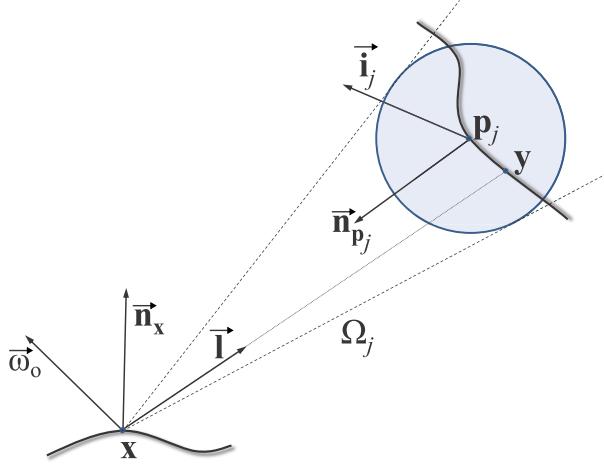


Figura 4.1: Luz esférica virtual. Un punto de una superficie x con normal n_x que el observador ve en la dirección ω_o recibe irradiancia desde la luz virtual en la posición p_j , cuya normal es n_{p_j} y generada por un camino incidente desde i_j . La contribución de la luz sobre el punto es la integral del producto de las BSDFs y los términos coseno en los puntos y en todo el ángulo sólido Ω . Fuente [Hašan et al. 2009]

Esta evaluación hace varias aproximaciones, como considerar que la visibilidad de todos los puntos dentro del cono de direcciones Ω_j está definido por la visibilidad entre el punto x y la localización de la luz virtual p_j , que la normal a la superficie y la BSDF es igual dentro de todo el radio de la luz esférica o que el término coseno $\cos(\vec{n}_p, \vec{-l})$ descarta todos los punto y situados fuera de la esfera. Todas estas aproximaciones se hacen con el fin de evitar tener que realizar conexiones de sombra entre el punto x y todos los puntos de superficie dentro de la esfera de la luz virtual, que elevaría considerablemente el coste de la técnica.

La consideración de una luz puntual como una luz esférica provoca que la irradiancia de la escena quede difuminada, evitando las singularidades pero también introduciendo sesgo en el resultado. Nuestro planteamiento en este caso es reducir progresivamente el radio r_i de las luces virtuales en cada iteración del algoritmo, siguiendo el mismo esquema que se aplica en *progressive photon mapping*:

$$r_i = r_1 * \sqrt{i^{\alpha-1}}, \quad (4.4)$$

siendo r_1 el radio inicial y α el factor que regula el aumento de la varianza con cada iteración.

Un análisis más detallado del cálculo del radio y el efecto del factor α puede encontrarse en la Sección 5.2.

Conforme se reduce el radio de la luz virtual esférica, su evaluación tiende a ser la misma que la de una luz puntual, eliminando el sesgo introducido por las diferentes aproximaciones de la técnica. El resultado de aplicar este esquema progresivo puede apreciarse en las Figura 5.6.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo presentamos los resultados relevantes obtenidos a lo largo de este proyecto. Todas las imágenes presentadas en esta sección han sido renderizadas haciendo uso de nuestro integradores progresivos implementados sobre el trazador de rayos basado en física PBRT [Pharr and Humphreys 2010].

También introducimos algunas conclusiones prácticas extraídas de los resultados obtenidos por nuestro sistema, buscando encontrar los parámetros óptimos del sistema.

5.1. Detalles de implementación

El PBRT es un sistema de trazado de rayos desarrollado en C++ altamente modular, que cuenta con un buen número de algoritmos de iluminación global ya implementados, como *path tracing*, *photon mapping*, *Metropolis light transport* y la formulación original de *instant radiosity*.

Montar la infraestructura para nuestro planteamiento progresivo ha requerido extender ciertas partes de la infraestructura ofrecida por el PBRT. Ha sido necesario implementar un nuevo renderizador capaz de ejecutar un número arbitrario de veces el algoritmo en vez de tomar un número dado de muestras, como es el caso de los renderers base de PBRT.

Los dos esquemas progresivos en este trabajo han sido implementados como un sólo integrador, que genera luces virtuales mediante trazado estocástico de partículas y las evalúa como luces puntuales o como luces esféricas en la fase de renderizado dependiendo de los parámetros con los que se ejecuta. Tanto el trazado de partículas como el renderizado están paralelizados dividiendo la tarea en paquetes de trabajo que se ejecutan en paralelo.

5.2. Selección de parámetros

Anteriormente en la Sección 4.2 hemos explicado en qué consisten nuestros esquemas de reducción y cómo el factor α acota el crecimiento de la varianza en cada paso. En esta sección analizaremos como los distintos parámetros iniciales del algoritmo, es decir, la cota de *clamping* inicial y el factor α para el *clamping* progresivo y el radio inicial y el factor α para las luces esféricas. Para ello analizaremos el error que se introduce en la escena tras varias iteraciones usando diferentes valores de α y comparándolas con el *ground truth*, calculado usando *path tracing*.

En el caso del *clamping* progresivo, al comparar el MSE entre varios posibles valores de

α (véase Figura 5.1), no hemos encontrado diferencias notables, aunque visualmente un valor $\alpha = 0,6$ es el que ofrece mejores resultados como se puede apreciar en la comparativa de la Figura 5.3. Eso parece indicar que MSE no es una métrica adecuada para evaluar los errores en estos métodos: aunque no tan válidas en términos de varianza y sesgo, el uso de métricas perceptuales (p.ej. [Mantiuk et al. 2004]) podrían ser usadas para el error perceptual introducido por el algoritmo.

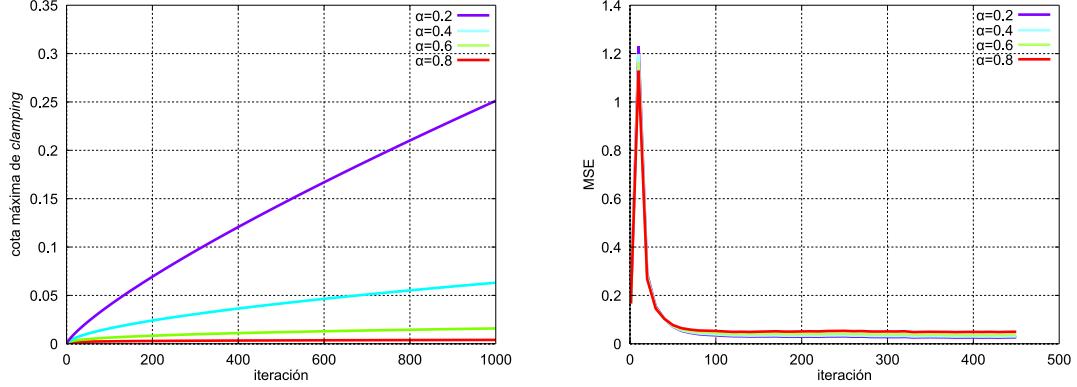


Figura 5.1: La gráfica de la izquierda como va aumentando la cota máxima de *clamping* para distintos valores del factor α , partiendo de una cota inicial de 0,001. La gráfica de la derecha muestra como evoluciona el error de la escena mostrada en la Figura 5.3 para distintos valores de α . Podemos ver que aunque una reducción rápida del *clamping* (valores pequeños de α) introducen mayor error en las iteraciones iniciales, según aumenta el número de las mismas su convergencia es ligeramente mejor en términos de MSE. Sin embargo, como se observa en la Figura 5.3, esta mejora no se traduce en mejor calidad de imagen.

La selección del valor inicial de sesgo (cota máxima inicial b_1 o radio inicial r_1) es importante para obtener resultados visualmente buenos en el menor tiempo posible. Esto se muestra en la Figura 5.4, donde se comparan distintos radios iniciales para las luces virtuales esféricas, utilizando una reducción de radio fija de $\alpha = 0,6$ (la Figura 5.2 muestra el comportamiento de la reducción de radio para distintos valores de α). Nótese cómo elegir un radio pequeño apenas reduce las singularidades, ya que la luz esférica es demasiado puntual, mientras que un radio demasiado grande puede *blurear* demasiado las altas frecuencias de la iluminación. La elección del radio óptimo es dependiente de las señales de la iluminación en la localidad de cada luz virtual, y queda como trabajo futuro.

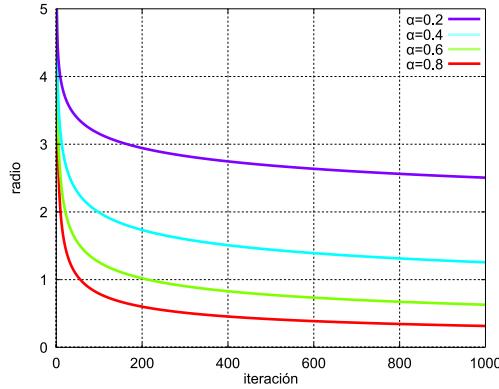


Figura 5.2: Esta gráfica muestra el efecto que el factor α tiene sobre el valor del radio en cada iteración del algoritmo (dado un radio inicial de 5).

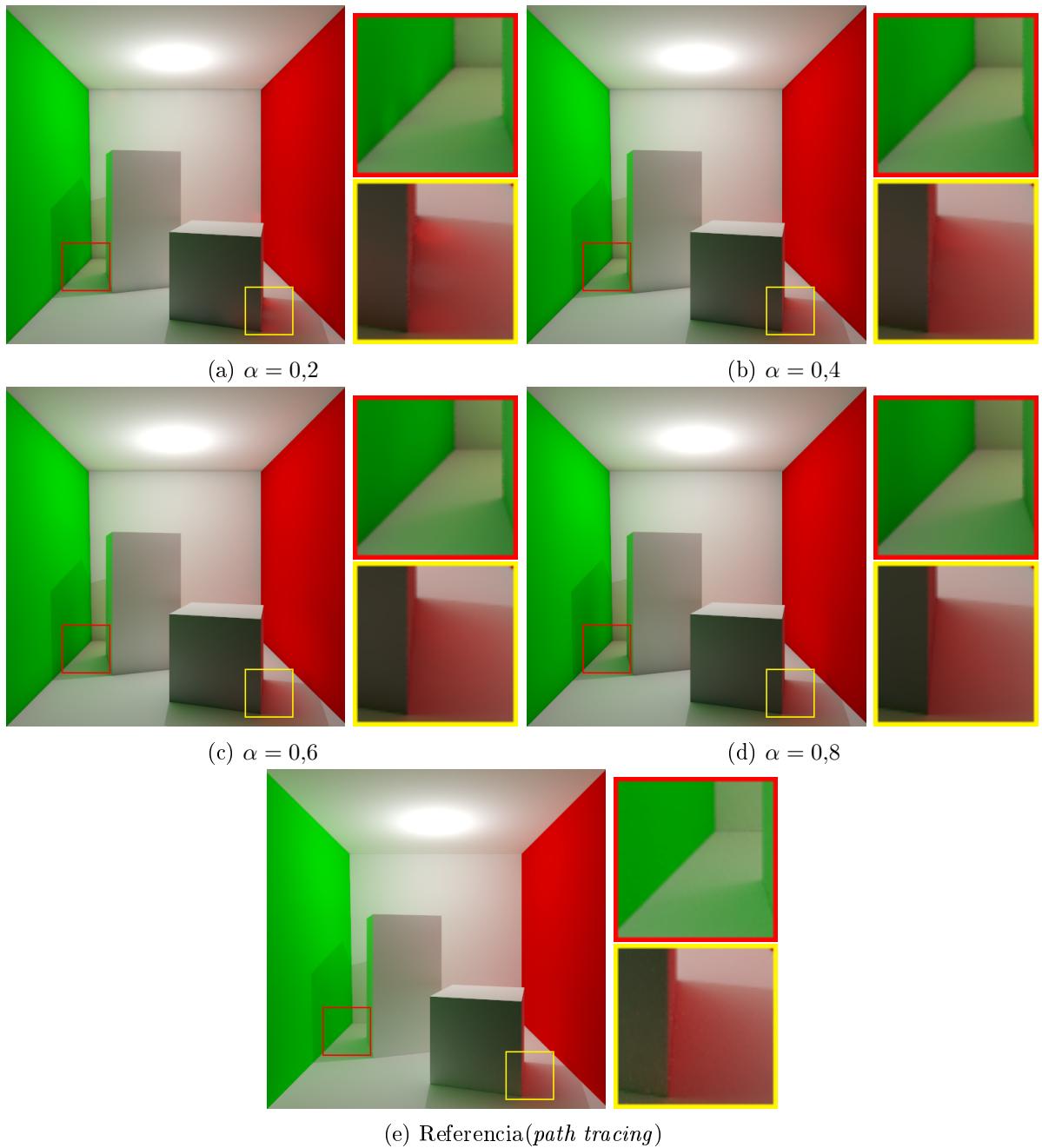
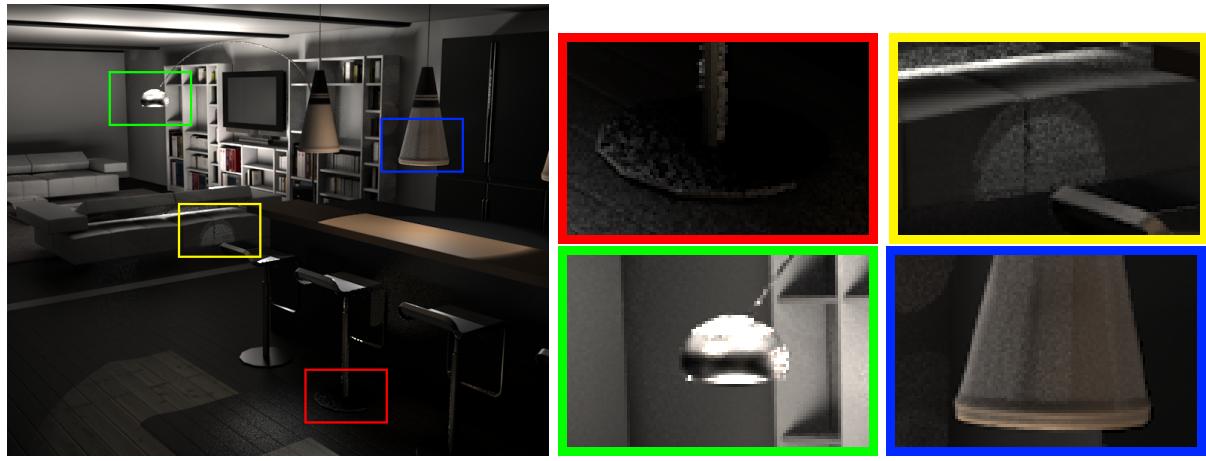
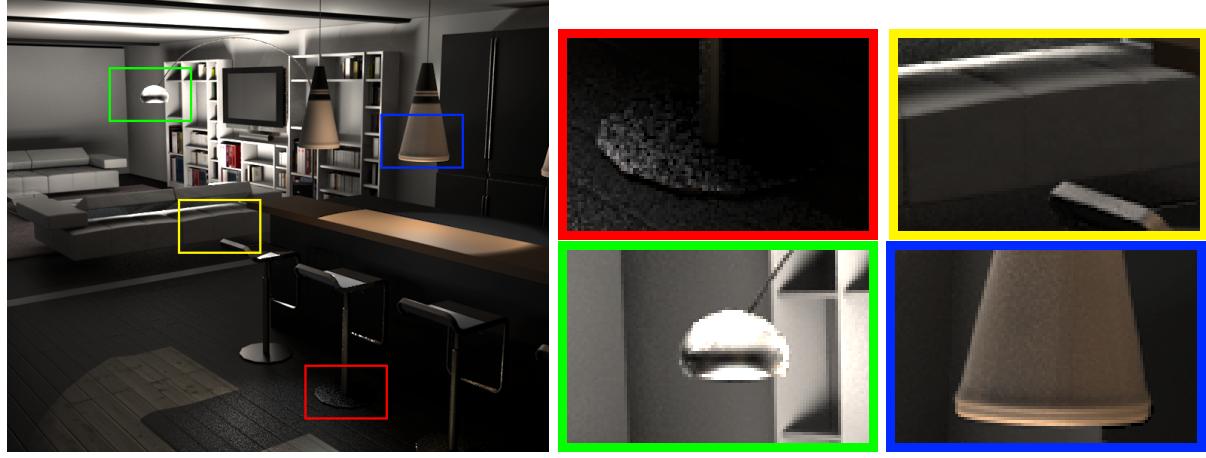


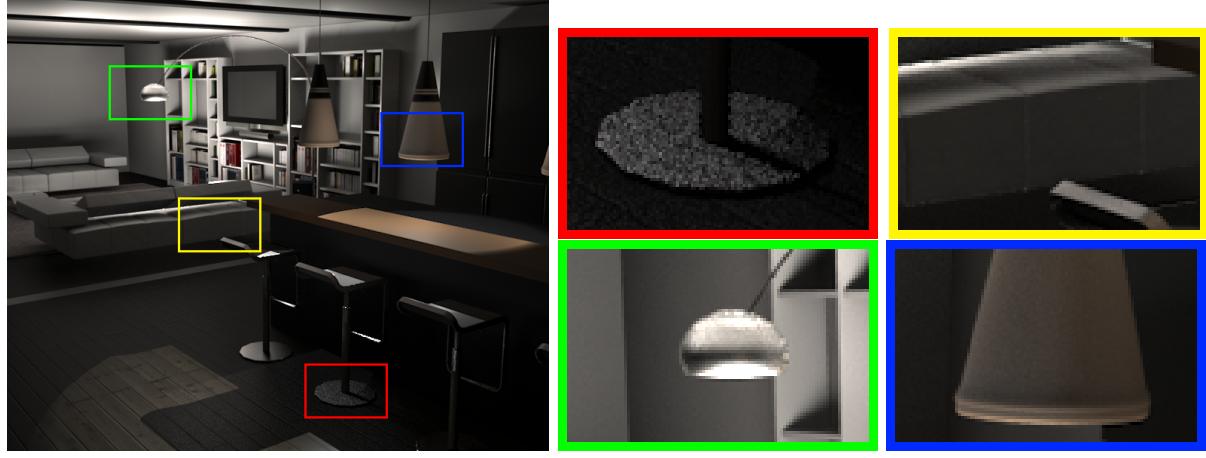
Figura 5.3: Una Cornell box clasica renderizada con ≈ 200000 tras 450 iteraciones del algoritmo, para una cota de *clamping* inicial de 0,001 y distintos valores para el factor de reducción α . Es posible apreciar como un valor muy pequeño de α (a) propicia la reaparición temprana de los picos de varianza, mientras que un factor muy elevado (d) remueve excesiva radiancia de la escena. Un valor intermedio de alrededor de 0,6 da buenos resultados con todas las escenas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4: La escena de la villa, renderizada con ≈ 90000 luces virtuales esféricas en 256 iteraciones con $\alpha = 0,6$ y radio inicial de 0,5 (a), 1 (b) y 2 (c). Puede observarse que la elección del radio inicial tiene una fuerte influencia en la calidad de la imagen final. Elegir un radio demasiado pequeño para la escena provoca la aparición de picos suaves de iluminación (como es el caso de la escena a), mientras que un radio demasiado grande desenfoca en exceso los materiales *glossy*, perdiendo efectos interesantes en la escena (como puede verse en la escena c). Aún teniendo en cuenta que un número suficiente de iteraciones del algoritmo harían desaparecer estos artefactos, una elección apropiada del radio inicial es importante para obtener resultados visualmente atractivos en menor tiempo.

5.3. Resultados adicionales

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran el comportamiento de nuestra formulación progresiva de *instant radiosity* usando *clamping* y luces esféricas respectivamente, en dos escenas difusas. En ambos casos se compara con no introducir sesgo en la imagen, y con un *ground truth* calculado usando *path tracing*. Podemos ver cómo nuestra técnica elimina los artefactos visuales introducidos por *instant radiosity*, obteniendo resultados muy similares al *ground truth*. También se puede ver cómo el uso del *clamping* (Figura 5.5) reduce ligeramente la luminosidad de la escena debido al sesgo introducido, de modo que más iteraciones serían necesarias para reducir este error.

Finalmente, las Figuras 5.7 y 5.8 muestran cómo nuestra formulación progresiva puede obtener resultados visualmente correctos en escenas con caminos complejos de alta frecuencia debido a superficies con una componente especular alta.

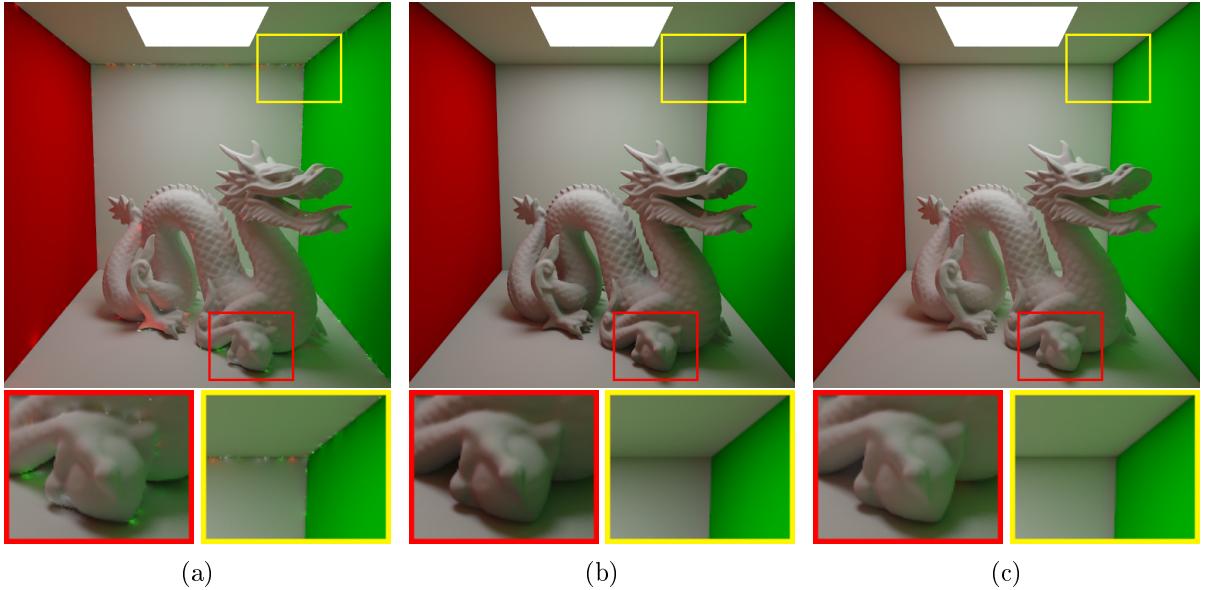


Figura 5.5: Cornell box con el dragón de Standford, renderizada con ≈ 5000 luces virtuales, sin *clamping* (a), con un factor de *clamping* constante del 0,01 (b) y con el mismo factor de *clamping* y un factor de reducción $\alpha = 0,66$. La técnica progresiva permite eliminar las singularidades provocadas por el término geométrico reduciendo la pérdida de radiancia.

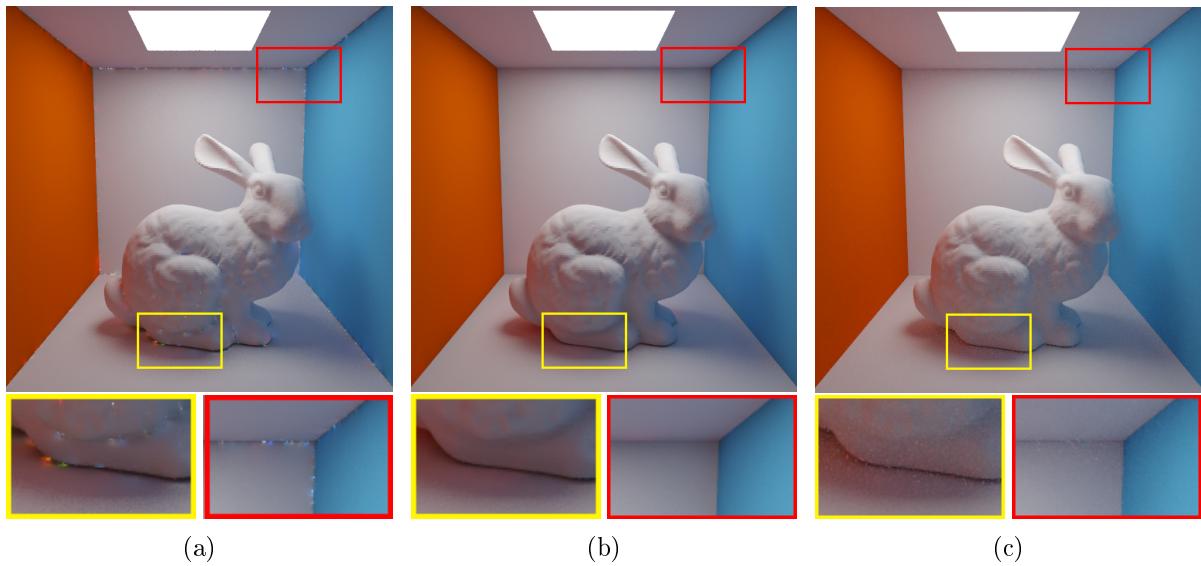
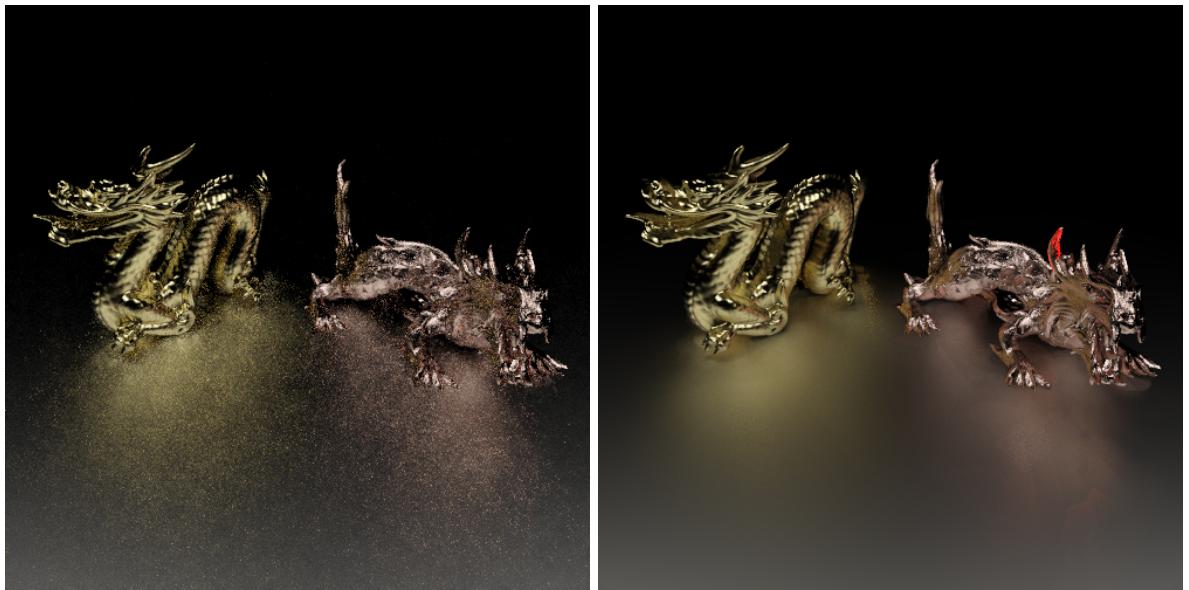


Figura 5.6: Cornell box con el conejo de Standford, renderizada con ≈ 100000 con luces virtuales puntuales y sin *clamping* (a), con ≈ 80000 virtuales con nuestro integrador progresivo basado en luces virtuales esféricas (b) y mediante *path tracing* (c). Con un tiempo de renderizado similar, el resultado de *path tracing* todavía contiene ruido e *instant radiosity* presenta fuertes singularidades, mientras que nuestro método ofrece un resultado visualmente más aceptable.



Figura 5.7: Cornell box con el modelo del XYZ dragon de Standford con una BRDF de oro capturada, renderizado con ≈ 70000 luces virtuales haciendo uso de nuestro integrador progresivo de luces esféricas, con un radio inicial de 5 y $\alpha = 0,6$



(a)

(b)

Figura 5.8: Los modelos dragon de Standford con BRDF de oro capturada y XYZ dragon de Standford con BRDF de cobre capturada, sobre una superficie altamente especular. La escena ha sido renderizada con *Mtropolis light transport* (a) y nuestro integrador progresivo de luces esféricas (b), con un radio inicial de 2,5 y $\alpha = 0,6$. Observése como nuestro método es capaz de capturar de manera precisa las complejas caústicas presentes en la escena.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo hemos estudiado el algoritmo de iluminación global *instant radiosity*, analizado sus fuente de artefactos visuales más comunes. En base a este análisis, hemos evaluado los trabajos previos que tratan de resolver estos artefactos mediante la introducción de sesgo (*clamping* [Keller 1997, Walter et al. 2012] y luces esféricas virtuales [Hašan et al. 2009]), y los hemos reformulado como estimadores progresivos que, en el límite, resultan en una solución sin sesgo ni varianza. Finalmente, hemos implementado las formulaciones progresivas de dichos algoritmos sobre el *raytracer* PBRT [Pharr and Humphreys 2010], comparando su eficacia comparada con la técnica original y con otras técnicas usadas en iluminación global.

6.1. Discusión y Trabajo futuro

Nuestras técnicas progresivas no están totalmente automatizadas, requieren ajuste por parte del usuario de ciertos parámetros poco intuitivos cuyo valor afecta de manera significativa a la velocidad de convergencia del algoritmo. Dichos parámetros son el factor de *clamping* b_1 inicial en el caso de la reducción progresiva de *clamping* y el radio máximo inicial r_1 en el caso de la reducción del radio de las luces virtuales esféricas.

Un factor de *clamping* muy bajo puede llevar a que el número de iteraciones necesarias para compensar la pérdida de rediancia sea muy elevado, mientras que un factor muy permisivo puede provocar la aparición temprana de picos de iluminación. En este trabajo hemos usado un factor de *clamping* inicial de 0,001, pero su valor óptimo es localmente dependiente de la escena y sería deseable el desarrollo de un mecanismo para automatizar la selección del mismo en función de la geometría alrededor del punto a iluminar, sus propiedades materiales, así como de la calidad deseada o el número de iteraciones a usar.

Las luces virtuales esféricas se basan en de que la irradiancia de una luz virtual se reparte uniformemente dentro de un cierto radio sobre la superficie en que fue depositada. Para que esta aproximación sea exacta es necesario que el radio elegido esté acorde a la escala de la escena, ya que un radio demasiado grande puede llevar a un difuminado excesivo de la radiancia y uno excesivamente pequeño propiciar la aparición de singularidades, provocando en ambos casos que el número de iteraciones necesarias para lograr un resultado aceptable. En este trabajo hemos usado dos métodos para asignar el radio de cada luz virtual esférica: partir de un radio global inicial introducido por el usuario, y calcular el radio en base a una búsqueda de vecinos más cercanos de luces virtuales, siguiendo una aproximación similar a la empleada por Hašan et al. [2009]. Usar un radio global simplifica el preproceso del algoritmo, ya que al inicio de cada

iteración sólo es necesario calcular el radio global a usar en dicha etapa aplicando la Ecuación 4.3. Por otro lado, usar una búsqueda de vecinos cercanos es más costoso y aumenta el tiempo de preprocesso de cada iteración, pero tiene la ventaja de no requerir ajuste por parte del usuario. No hemos encontrado diferencias visuales apreciables en la aplicación de una u otra técnica de cálculo del radio, pero creemos que el desarrollo de una heurística más robusta automatizada podría mejorar considerablemente la eficiencia del sistema. En ese sentido, el uso de la estimación la función de irradiancia local alrededor de la VSL, en el espíritu del trabajo de Kaplanyan and Dachsbacher [2013a], podría dar una mejor aproximación del radio de cada luz esférica.

Las técnicas progresivas presentadas en este trabajo son complementarias entre sí y fácilmente integrables dentro de otras técnicas de iluminación global mediante luces virtuales usadas en producción, como *Lightcuts* [Walter et al. 2005; 2006; 2012] o *Point based color bleeding* [Christensen 2008, Buisán 2014]. Incorporar estas técnicas eficientes a nuestro esquema progresivo requeriría un análisis previo del sesgo introducido por las mismas. Para aumentar la flexibilidad y eficiencia del sistema sería interesante poder combinar las distintas técnicas mediante el uso de *multiple importance sampling* [Veach and Guibas 1995], combinando óptimamente el clamping y las luces esféricas basadas en las propiedades de los materiales, minimizando así el error introducido.

Bajo este esquema, se podrían explotar las fortalezas de cada técnica y minimizar el sesgo introducido, siguiendo el espíritu de trabajos que combinan *path tracing* y *photon mapping* con el fin de lograr un transporte de luz robusto [Georgiev et al. 2012, Hachisuka et al. 2012, Křivánek et al. 2014]. En ese sentido, la inclusión de un nuevo estimador que introduzca sesgo en el dominio angular [Kaplanyan and Dachsbacher 2013b], en lugar de sólo en el dominio espacial (luces esféricas) permitiría de un algoritmo robusto incluso en caminos especulares como cáusticas, donde las técnicas basadas en *bidirectional path tracing* fallan.

Finalmente, los algoritmos que usan luces virtuales son una forma de un método más general como *bidirectional path tracing*: por tanto, la introducción de estos estimadores sesgados pero consistentes pueden ser utilizados a su vez en este tipo de esquemas para obtener resultados con menor varianza, a costa de introducir sesgo. Asimismo, la extensión de nuestras técnicas a medios participativos es trivial, aunque sería interesante evaluar la convergencia de los estimadores, que puede variar con respecto a la de transporte entre superficies.

6.2. Conclusiones personales

Aunque laboriosa, la realización de este trabajo ha sido una experiencia gratificante para mí. Gracias a él he entrado en contacto con el mundo de los gráficos por computador, el cual descocía casi por completo cuando empecé este proyecto, de la mano de un equipo de investigación que trabaja haciendo avanzar el campo día a día. Además, puedo decir que los integrantes del *Graphics and Imaging Lab*, además de grandes profesionales de la investigación, también son grandes personas. En especial he de agradecer el tiempo que han dedicado Adrián y Raúl durante el tiempo que ha durado el proyecto, cuya ayuda ha sido indispensable para la realización del mismo.

6.3. Diagrama temporal del proyecto

La Figura 6.1 expresa la evolución temporal del proyecto, iniciado en Mayo de 2014 y terminado en Octubre del mismo año.

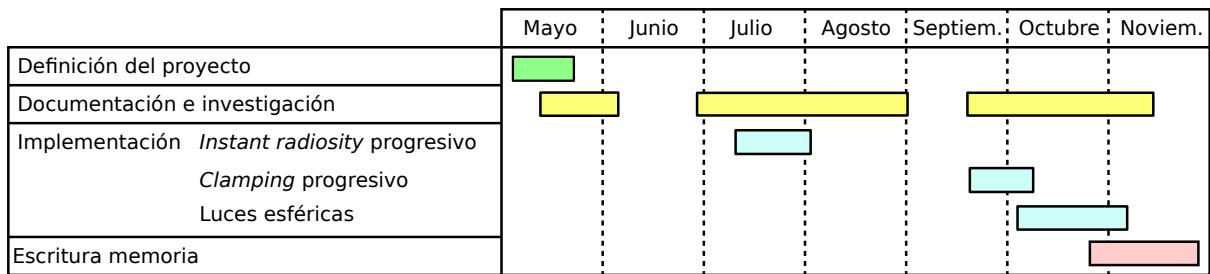


Figura 6.1: Diagrama de tiempos del proyecto

Bibliografía

- Buisán, R., Esporrín. Clustering bidireccional en iluminación global basada en puntos. Universidad de Zaragoza, 2014.
- Christensen, P. Point-based approximate color bleeding. *Pixar Technical Notes*, 2(5):6, 2008.
- Dachsbacher, C. and Stamminger, M. Reflective shadow maps. In *Proceedings of the 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, I3D '05, pages 203–231, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN 1-59593-013-2.
- Dachsbacher, C., Křivánek, J., Hašan, M., Arbree, A., Walter, B., and Novák, J. Scalable realistic rendering with many-light methods. *Computer Graphics Forum*, 33(1):88–104, 2014. ISSN 1467-8659.
- Davidovič, T., Křivánek, J., Hašan, M., Slusallek, P., and Bala, K. Combining global and local virtual lights for detailed glossy illumination. *ACM Trans. Graph.*, 29(6):143:1–143:8, December 2010. ISSN 0730-0301.
- Dutré, P., Lafourte, E. P., and Willems, Y. Monte carlo light tracing with direct computation of pixel intensities. In *3rd International Conference on Computational Graphics and Visualisation Techniques*, pages 128–137, 1993.
- Engelhardt, T., Novák, J., Schmidt, T.-W., and Dachsbacher, C. Approximate bias compensation for rendering scenes with heterogeneous participating media. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics 2012)*, 31(7):2145–2154, 2012.
- Georgiev, I., Křivánek, J., Davidovič, T., and Slusallek, P. Light transport simulation with vertex connection and merging. *ACM Trans. Graph.*, 31(6):192:1–192:10, nov 2012. ISSN 0730-0301.
- Hachisuka, T. and Jensen, H. W. Stochastic progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):141:1–141:8, December 2009. ISSN 0730-0301.
- Hachisuka, T., Ogaki, S., and Jensen, H. W. Progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):130:1–130:8, December 2008. ISSN 0730-0301.
- Hachisuka, T., Pantaleoni, J., and Jensen, H. W. A path space extension for robust light transport simulation. *ACM Trans. Graph.*, 31(6):191:1–191:10, November 2012. ISSN 0730-0301.
- Hašan, M., Pellacini, F., and Bala, K. Matrix row-column sampling for the many-light problem. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), July 2007. ISSN 0730-0301.

- Hašan, M., Křivánek, J., Walter, B., and Bala, K. Virtual spherical lights for many-light rendering of glossy scenes. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):143:1–143:6, December 2009. ISSN 0730-0301.
- Jarabo, A., Marco, J., Muñoz, A., Buisan, R., Jarosz, W., and Gutierrez, D. A framework for transient rendering. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2014)*, 33(6), 2014.
- Jensen, H. W. *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001. ISBN 1568814623.
- Kajiya, J. T. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):143–150, August 1986. ISSN 0097-8930.
- Kaplanyan, A. S. and Dachsbacher, C. Adaptive progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 32(2):16:1–16:13, April 2013a. ISSN 0730-0301.
- Kaplanyan, A. S. and Dachsbaucher, C. Path space regularization for holistic and robust light transport. *Computer Graphics Forum (Proc. of Eurographics 2013)*, 32(2):63–72, 2013b.
- Keller, A. Instant radiosity. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ’97, pages 49–56, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. ISBN 0-89791-896-7.
- Knaus, C. and Zwicker, M. Progressive photon mapping: A probabilistic approach. *ACM Trans. Graph.*, 30(3):25:1–25:13, May 2011. ISSN 0730-0301.
- Kollig, T. and Keller, A. Illumination in the presence of weak singularities. In *Monte Carlo And Quasi-monte Carlo Methods*, pages 245–257, Berlin, 2004. Springer-Verlag. ISBN 3-540-25541-9.
- Křivánek, J., Ferwerda, J. A., and Bala, K. Effects of global illumination approximations on material appearance. *ACM Trans. Graph.*, 29(4):112:1–112:10, July 2010. ISSN 0730-0301.
- Křivánek, J., Georgiev, I., Hachisuka, T., Vévodá, P., Šík, M., Nowrouzezahrai, D., and Jarosz, W. Unifying points, beams, and paths in volumetric light transport simulation. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), 2014.
- Lafourture, E. P. and Willem, Y. D. Bi-directional path tracing. In *Proceeding of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques, COMPUGRAPHICS ’93*, pages 145–153, 1993.
- Mantiuk, R., Myszkowski, K., and Seidel, H.-P. Visible difference predictor for high dynamic range images. In *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 2763–2769, 2004.
- Novák, J., Engelhardt, T., and Dachsbaucher, C. Screen-space bias compensation for interactive high-quality global illumination with virtual point lights. In *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, I3D ’11, pages 119–124, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN 978-1-4503-0565-5.
- Novák, J., Nowrouzezahrai, D., Dachsbaucher, C., and Jarosz, W. Progressive virtual beam lights. *Comp. Graph. Forum*, 31(4):1407–1413, June 2012a. ISSN 0167-7055.
- Novák, J., Nowrouzezahrai, D., Dachsbaucher, C., and Jarosz, W. Virtual ray lights for rendering scenes with participating media. *ACM Trans. Graph.*, 31(4):60:1–60:11, July 2012b. ISSN 0730-0301.

- Owen, A. B. *Monte Carlo theory, methods and examples*. 2013.
- Pharr, M. and Humphreys, G. *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann. Morgan Kaufmann/Elsevier, 2010. ISBN 9780123750792.
- Raab, M., Seibert, D., and Keller, A. Unbiased global illumination with participating media. In *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 2006*, pages 591–605. Springer, 2008.
- Ramamoorthi, R., Anderson, J., Meyer, M., and Nowrouzezahrai, D. A theory of monte carlo visibility sampling. *ACM Trans. Graph.*, 31(5):121:1–121:16, September 2012. ISSN 0730-0301.
- Ritschel, T., Grosch, T., Kim, M. H., Seidel, H.-P., Dachsbacher, C., and Kautz, J. Imperfect shadow maps for efficient computation of indirect illumination. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):129:1–129:8, December 2008. ISSN 0730-0301.
- Ritschel, T., Engelhardt, T., Grosch, T., Seidel, H.-P., Kautz, J., and Dachsbaacher, C. Micro-rendering for scalable, parallel final gathering. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):132:1–132:8, December 2009. ISSN 0730-0301.
- Ritschel, T., Eisemann, E., Ha, I., Kim, J. D. K., and Seidel, H.-P. Making imperfect shadow maps view-adaptive: High-quality global illumination in large dynamic scenes. *Computer Graphics Forum*, 30(8):2258–2269, 2011. ISSN 1467-8659.
- Segovia, B., Iehl, J. C., Mitanchey, R., and Péroche, B. Bidirectional instant radiosity. In *Proceedings of the 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, EGSR’06, pages 389–397, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2006. Eurographics Association. ISBN 3-905673-35-5.
- Segovia, B., Iehl, J. C., and Péroche, B. Metropolis instant radiosity. *Computer Graphics Forum*, 26(3):425–434, 2007. ISSN 1467-8659.
- Veach, E. *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 1998. AAI9837162.
- Veach, E. and Guibas, L. J. Bidirectional estimators for light transport. In *Proceedings of Eurographics Rendering Workshop (1994)*, pages 147–162, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 1994. Eurographics Association.
- Veach, E. and Guibas, L. J. Optimally combining sampling techniques for monte carlo rendering. In *Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ’95, pages 419–428, New York, NY, USA, 1995. ACM. ISBN 0-89791-701-4.
- Veach, E. and Guibas, L. J. Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ’97, pages 65–76, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. ISBN 0-89791-896-7.
- Walter, B., Fernandez, S., Arbree, A., Bala, K., Donikian, M., and Greenberg, D. P. Lightcuts: A scalable approach to illumination. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1098–1107, July 2005. ISSN 0730-0301.
- Walter, B., Arbree, A., Bala, K., and Greenberg, D. P. Multidimensional lightcuts. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):1081–1088, July 2006. ISSN 0730-0301.

Walter, B., Khungurn, P., and Bala, K. Bidirectional lightcuts. *ACM Trans. Graph.*, 31(4):59:1–59:11, July 2012. ISSN 0730-0301.

Whitted, T. An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, 23(6):343–349, June 1980. ISSN 0001-0782.