



Departament d'Òptica i
Optometria

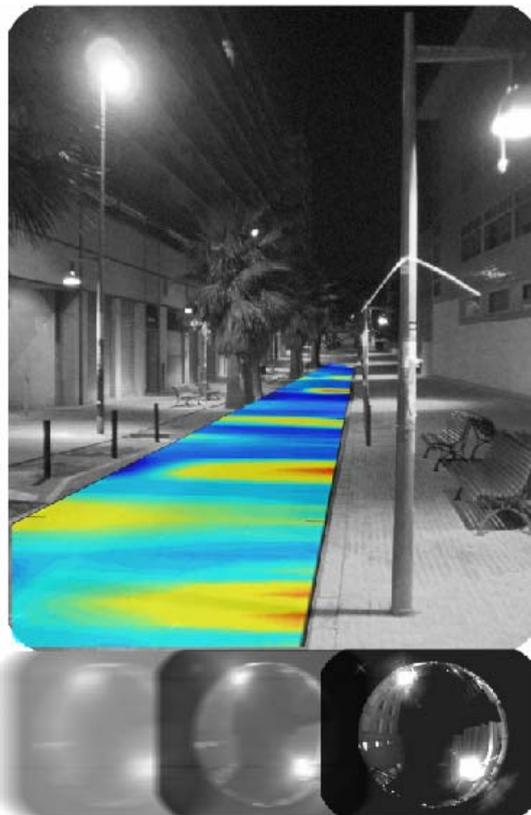
Universitat Politècnica de
Catalunya

Centre de Desenvolupament
de Sensors, Instrumentació i
Sistemes

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de un algoritmo de propagación de flujo luminoso
para un dispositivo fotométrico móvil con capacidad de
discretización angular.

Aplicación a la generación de mapas de
iluminación de alumbrado público.



José FERNÁNDEZ DORADO

Terrassa, Diciembre 2012



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Òptica i Optometria
Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes

**Desarrollo de un algoritmo de propagación de flujo luminoso
para un dispositivo fotométrico móvil con capacidad de
discretización angular.**

**Aplicación a la generación de mapas de
iluminación de alumbrado público.**

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya.

Programa de Ingeniería Óptica.

Doctorando

José Fernández Dorado

Director

Josep Arasa Martí.

Universitat Politècnica de Catalunya.

Codirector

José Antonio Díaz Navas.

Universidad de Granada.

Terrassa, Diciembre 2012

Datos personales

Doctorando:

José Fernández Dorado

Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes. (CD6)

Universitat Politècnica de Catalunya

Rambla Sant Nebridi, 10

08222 Terrassa, Barcelona. España.

e-mail: jose.fernandez.dorado@cd6.upc.edu

Director:

Prof. Dr. Josep Arasa

Universitat Politècnica de Catalunya

Rambla Sant Nebridi 10

Terrassa 08222, Spain

Email: arasa@oo.upc.edu

Codirector:

Prof. Dr. José Antonio Díaz Navas

Universidad de Granada

Fuente Nueva s/n

18071 Granada, España

Email: jadiaz@ugr.es

Agradecimientos

Seis años después de mi llegada al CD6 y tras no pocos obstáculos, toca escribir estas líneas que tantas veces había pensado en añadir a mi tesis doctoral, y es que como dice mi abuela María, *es de bien nacido ser agradecido*.

La culminación de un trabajo de investigación como lo es esta tesis doctoral se debe primordialmente a varios factores, en primer lugar, la constancia y testarudez por querer conseguirlo y en segundo lugar, la fortuna de tener un equipo humano con el máximo apoyo y solidez a tu lado.

Debo y sobre todo quiero destacar en primer lugar, el estímulo más que soberbio de Esther, siempre ha estado ahí, una ayuda y apoyo infinitos, faltan adjetivos en cualquier idioma para describir su respaldo, su cariño, gracias Esther...

Por supuesto, tengo palabras especiales para mi familia, mi madre, mi padre, mi hermano, sobre todo por su confianza en mí, ellos siempre me han animado, escoltado, escuchado y aconsejado de la mejor forma posible. Me siento tremendamente feliz por tenerlos a mi lado y brindarles estas líneas que ahora ya siempre serán tuyas.

Gracias a Josep, mi director, él también ha hecho posible que esta tesis sea escrita.

No podría olvidarme de mi codirector, José Antonio, gracias a él, conocí el CD6 y su trabajo como profesor durante mi etapa en la Universidad de Granada despertó en mí el interés y entusiasmo definitivos por encaminar mi carrera académica y profesional hacia la ingeniería óptica.

Gracias al personal del CD6, con todos ell@s el trabajo ha sido muchísimo más fácil.

Gracias a Enrique por el mimo y cuidado en todas y cada una de sus correcciones, un trabajo formidable y todo un detalle de un gran amigo.

Gracias también a Javier por su valiosa aportación en la redacción del texto.

A mis amig@s, gracias, a los del norte y a los del sur, todos ell@s son un excelente grupo de personas que me han hecho sentir su ánimo en numerosas ocasiones.

Resumen

Resumen

Esta tesis doctoral aborda el desarrollo de un algoritmo de propagación del flujo luminoso que permite a un dispositivo fotométrico realizar las medidas de la distribución de iluminación en grandes áreas, entre las cuales se encuentran las correspondientes a los sistemas de alumbrado público.

El dispositivo permite detectar la cantidad y dirección de iluminación en cada punto de medida. El algoritmo, en conjunción con la estrategia de la medida propuesta demuestran a través de los resultados que es posible efectuar las medidas de forma dinámica. La caracterización del dispositivo empleado y los resultados experimentales obtenidos son comentados y analizados.

La tesis presentada está avalada por la concesión del proyecto público POLUX financiado por el Ministerio de Ciencia e innovación. Así mismo, la tesis ha desembocado en la publicación y concesión de una patente. Finalmente, parte de los resultados de este trabajo de investigación han sido publicados en congresos de carácter nacional e internacional.

Resumen

Resum

Aquesta tesi doctoral aborda el desenvolupament d'un algoritme de propagació del flux lluminós que permet a un dispositiu fotomètric realitzar les mesures de la distribució d'il·luminació en grans àrees com ho són les corresponents als sistemes d'enllumenat públic.

El dispositiu permet detectar la quantitat i direcció de l'il·luminació en cada punt de mesura. L'algoritme, en conjunció amb l'estratègia de la mesura proposada demostra a través de que és possible fer les mesures de forma dinàmica. La caracterització del dispositiu emprat i els resultats experimentals obtinguts són comentats i analitzats.

La tesi presentada està avalada per la concessió del projecte públic Polux finançat pel Ministerio de Ciencia e Innovación. Així mateix, la tesi ha desembocat en la publicació i concessió d'una patent. Finalment els resultats d'aquesta tesi doctoral també han estat presentats i publicats en comunicacions a congressos d'àmbit nacional i internacional.

Resumen

Abstract

This dissertation discusses the development of a luminous flux power propagation algorithm that allows a device to carry out photometric measurements over large areas such as those of public streetlighting systems.

The device detects the amount and direction of light at each measurement point. The algorithm, in conjunction with the proposed measurement strategy shows by means of the results that it is possible to measure dynamically. Additionally, the characterization of the device and the experimental results are discussed and analyzed.

The presented thesis is supported by the public project grant POLUX funded by the Ministerio de Ciencia e Innovación of Spain. Furthermore, a patent has been granted in relation with this thesis. Finally, scientific results of this dissertation have been published in national and international meetings.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Motivación	1
Capítulo 2. Introducción.....	3
Planteamiento técnico.....	3
Sobre la necesidad del dispositivo.....	5
Estructura de la tesis.....	7
Capítulo 3. Estado del arte.....	10
3.1.- Legislación vigente sobre las medidas de iluminación de alumbrado público...	11
3.1.1.- Campo de aplicación.....	11
3.1.2.- Objetivos: Eficiencia energética y contaminación lumínica.....	13
3.1.3.- Legislación española. Real Decreto 1890/2008.....	15
Objetivos y campos de aplicación.....	15
Instrucciones técnicas complementarias.....	16
Comprobaciones de validez para las medidas.....	17
Medida de luminancia.....	18
Medida de la iluminación.....	18
Deslumbramiento perturbador.....	19
Eficiencia energética.....	21
3.2.- Procedimientos reglamentados de la medida de la iluminación.....	23

3.2.1.- Medida estática de la iluminación. Retícula de medida.....	23
3.2.2.- Método de los nueve puntos.....	25
3.2.3.- Método para la medida de la iluminación en glorietas.....	26
3.2.4.- Método de medida para la iluminación en áreas de forma irregular.....	27
3.2.5.- Método dinámico de la medida de la iluminación.....	28
3.3.- Equipos fotométricos de medida actuales.....	29
3.3.1.- Parámetros fotométricos fundamentales de los luxómetros.....	30
i) Curva fotométrica espectral relativa al sistema visual humano.....	30
ii) Respuesta direccional.....	31
iii) Linealidad.....	32
iv) Fatiga.....	32
v) Dependencia con la temperatura.....	33
vi) Cambio de intervalo.....	33
3.3.2.- Dispositivos empleados en la medida de la iluminación.....	34
Fotómetros industriales.....	36
Fotómetros portátiles.....	37
Fotómetros de luz reflejada.....	37
Fotodiodos.....	38
Videofotómetros.....	39
Dispositivos combinados.....	40
3.3.3.- Trabajos y metodologías actuales empleadas en la medida de la iluminación de instalaciones de alumbrado público.....	42
3.4.- Luminarias y lámparas para alumbrado público.....	46
3.4.1.- Elementos de las luminarias.....	46
1. Armadura o carcasa.....	46
2. Equipo eléctrico.....	47
3. Reflectores.....	47
4. Difusores.....	47
5. Filtros.....	47
3.4.2.- Lámparas empleadas en iluminación pública.....	49
Capítulo 4. Estrategia de medida.....	51
4.1. Principio de medida.....	52
4.1.1.- Contexto teórico.....	52
4.1.2.- Validez de la ley del cuadrado de la distancia en el principio de medida...	65

4.1.3.- Muestreo y propagación de la medida.....	69
4.2. Discretización angular de la medida fotométrica.....	78
4.2.1.- Digitalización angular de la medida fotométrica.....	79
4.2.2.- Ecuación angular de correspondencia energética.....	81
Transmitancia.....	86
Distancia focal.....	87
Inclinación y tamaño de pupila.....	47
Término $\cos^4(\theta)$	47
4.2.3.- Cómputo de la energía total y correlación con la medida discreta angular.....	92
4.3. Rango dinámico.....	95
4.3.1. Rango de valores de la medida de la iluminación.....	95
Rango dinámico del luxómetro.....	47
Rango dinámico de la cámara.....	47
4.4. Generación de nodos de medida.....	99
4.4.1.- Medidas cooperativas.....	99
4.4.2.- Interpolación de la información generada en la medida.....	101
4.5. Representaciones del registro seleccionadas.....	104
4.5.1.- Mapa de iluminación mediante curvas isolux.....	105
4.5.2.- Mapas de medidas angulares asociadas a los nodos.....	108
Capítulo 5. Caracterización del instrumental empleado.....	110
5.1 Luxómetro.....	111
5.1.1. Respuesta direccional.....	111
5.1.2. Linealidad.....	116
5.1.3. Respuesta espectral.....	119
5.1.4. Dependencia con la temperatura.....	120
5.1.5. Fatiga.....	121
5.1.6. Cambio de intervalo.....	122
5.2 Sensor CMOS.....	124
5.2.1. Linealidad.....	124
Caracterización de la linealidad en función de la luminancia.....	125
Caracterización de la linealidad en función del tiempo de exposición.....	126
5.2.2. Respuesta espectral.....	131
Lámpara de vapor de mercurio.....	132

Lámpara de vapor de sodio a baja y alta presión.....	133
5.2.3. Ruido.....	134
Ruido patrón.....	134
Ruido aleatorio y en bandas.....	135
5.3 Objetivo gran angular.....	138
5.3.1. Enfoque.....	138
5.3.2. Distorsión.....	139
5.3.3. Transmitancia.....	145
5.4 Algoritmo desarrollado.	148
5.4.1. Etapa de medida.	149
5.4.2. Etapa de filtrado.	154
5.4.3. Etapa de propagación y representación.....	159
Capítulo 6. Resultados experimentales.....	169
6.1 Resultados experimentales en laboratorio.....	170
6.1.1. Medida de laboratorio en P02.....	172
Condiciones de medida.....	172
Resultados en laboratorio. Propagación desde P02.....	174
Resultados en laboratorio. Análisis de errores.....	175
Discusión de resultados.....	175
Análisis del error relativo.....	177
Análisis del error absoluto.....	177
Análisis de los mapas isolux.....	179
Conclusión sobre las medidas de laboratorio.....	179
6.2 Resultados experimentales en campo.....	181
6.2.1. Medida de campo en P02.....	183
Condiciones de medida.....	183
Resultados en campo. Propagación desde P02.....	186
Resultados en campo (P02)laboratorio. Análisis de errores.....	190
Resultados en campo (P02). Mapas isolux.....	191
Discusión de resultados.....	192
Análisis del error relativo.....	192
Análisis del error absoluto.....	193
Análisis de los mapas isolux.....	194
Conclusión sobre las medidas de campo (P02).....	172

6.2.2. Medida de campo en P10.....	196
Condiciones de medida.....	196
Resultados en campo. Propagación desde P10.....	198
Resultados en campo (P10)laboratorio. Análisis de errores.....	199
Resultados en campo (P10). Mapas isolux.....	200
Discusión de resultados.....	201
Análisis del error relativo.....	202
Análisis del error absoluto.....	203
Análisis de los mapas isolux.....	203
Conclusión sobre las medidas de campo (P10).....	204
Generación de internodos.....	205
Resultados en campo. Interpolación P10.....	213
Resultados interpolación (P10). Análisis de errores.....	214
Interpolación (P10). Mapas isolux.....	215
Discusión de resultados.....	216
Análisis del error relativo.....	216
Análisis del error absoluto.....	217
Análisis de los mapas isolux.....	218
Conclusiones sobre las medidas en campo inter nodos (P10).....	220
Evaluación de la calidad de la instalación.....	221
Capítulo 7. Conclusiones.....	224
Capítulo 8. Trabajo futuro.....	230
Anexo A. Fotometría y medidas policromáticas.....	233
Anexo B. Proceso dinámico de la realización de las medidas cooperativas.....	242
Anexo C. Fotografías.....	252
Anexo D. Financiación, publicaciones y diseminación de la tesis.....	255
Bibliografía.....	261

Capítulo 1

Motivación

La presente tesis doctoral tiene por objeto profundizar en el conocimiento de los algoritmos de medida y la instrumentación necesaria vinculados con el proceso de diseño y fabricación de un nuevo dispositivo fotométrico. El dispositivo ha de ser capaz de medir dinámicamente la iluminación en instalaciones de alumbrado público, obteniendo la cantidad de flujo luminoso por unidad de área y la procedencia del mismo. Para obtener dicha información se hará uso de la propagación de la información obtenida en cada punto medida para proporcionar, en última instancia, el mapa isolux proporcionado por las instalaciones de alumbrado público.

El trabajo que se presenta, está enmarcado dentro del proyecto POLUX [Polux 2011] y pretende ser una tesis que actúe como texto de transferencia tecnológica resolviendo en profundidad las cuestiones técnicas que a nivel de ingeniería óptica involucra el desarrollo del dispositivo experimental.

El proyecto Polux tiene por objetivo el desarrollo de nuevos procesos industriales para controlar instrumentos de medida destinados al ahorro energético en instalaciones de iluminación. Se pretende revisar las estrategias tradicionales de medida de los niveles de iluminación para incorporar la medida de la dirección del flujo luminoso recibido por unidad de superficie y adaptarlo a las características de los métodos de propagación de flujo para poder

obtener la reconstrucción virtual de la instalación. Esta tecnología permitirá identificar el cumplimiento o no de las normas vigentes en las instalaciones de alumbrado público.

La elección del tema de esta tesis responde al desarrollo de un algoritmo de propagación de flujo luminoso que pueda ser empleado por un dispositivo fotométrico con el objetivo de analizar los sistemas de iluminación que se encuentran en zonas urbanas. En especial, los sistemas de alumbrado público, obteniendo de este modo datos relevantes sobre la eficiencia energética de las instalaciones y las acciones futuras a realizar para minimizar el gasto energético.

Este tipo de dispositivo fotométrico podrá procesar a través del algoritmo de propagación de flujo luminoso una mayor cantidad de información acerca de la iluminación proporcionada por las instalaciones de alumbrado público. Permitirá optimizar las medidas realizando un mayor número de registros en un menor tiempo, lo que se traducirá en un mayor conocimiento de las condiciones de iluminación.

El cambio en el marco normativo producido por aprobación de la Directiva Europea de Eficiencia Energética está propiciando nuevos requerimientos relativos al consumo de energía, iluminación, aislamiento, calefacción, climatización, agua caliente sanitaria, certificación energética de edificios o utilización de la energía solar.

En lo que al sector de la iluminación de espacios públicos se refiere, la eficiencia energética tiene como consecuencia directa e inmediata, el ahorro de costes y la reducción de emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂.

En el entorno del ahorro energético, la propia normativa plantea el uso de sistemas y sensores encargados de regular, controlar y detectar el nivel de iluminación proporcionado por las instalaciones. Asimismo, se hace necesaria la elaboración de un plan de mantenimiento de las instalaciones de iluminación para asegurar la eficiencia de la instalación.

La temática de esta tesis tiene aplicación práctica pero no pierde la rigurosidad que demanda una tesis doctoral, tanto a nivel teórico como a nivel de aplicación de la misma. Es una tesis de alto contenido en programación y medidas experimentales dividido a partes iguales prácticamente.

Capítulo 2

Introducción

Planteamiento técnico

La tesis que se presenta a continuación describe el desarrollo de un algoritmo de propagación de flujo luminoso. Este algoritmo ha de servir para el diseño y construcción de un dispositivo fotométrico y al procedimiento para la medida dinámica de la iluminación y su dirección de procedencia en instalaciones de alumbrado público.

El dispositivo ha de realizar la medida fotométrica de fuentes de luz policromática mediante un procedimiento de medida indirecto cuya aplicación pretende ser dinámica, es decir, en movimiento. La medida se efectúa de forma adaptada al entorno desplazando el dispositivo respecto a la superficie que se quiere analizar independientemente de su ubicación o forma.

Existen una gran variedad de aplicaciones para las cuales es necesario conocer la cantidad y distribución del flujo luminoso sobre una superficie y determinar así la iluminación en cualquier punto de la misma. Este análisis puede formar parte de procedimientos de inspección, controles de calidad de sistemas de iluminación de arquitectura, ingeniería civil, seguridad pública o circulación vial.

En este sentido, actualmente existen dispositivos radiométricos y fotométricos basados en tecnologías como la fotoeléctrica ó la CCD que realizan medidas sobre pequeñas áreas de medida, siendo un valor importante de la presente tesis doctoral su capacidad de aplicación en grandes áreas. Una referencia fiable de equipos que utilizan tecnología CCD para realizar medidas fotométricas es el correspondiente al desarrollado dentro del proyecto europeo NICOLAU [NICOLAU 2005] que plantea la posibilidad de medir la fotometría completa de faros de automóvil, si bien, este equipo no puede realizar medidas angulares superiores a los 40°. [Arranz 2004]

El algoritmo planteado en esta tesis permitirá determinar las pendientes de haces estrechos de luz enfocando a infinito el objetivo de una cámara digital. De esta forma, la energía captada por cada píxel, considerando su reducido tamaño, provendrá de una única orientación. El mapa de distribuciones de luz sobre el sensor puede ser extrapolado, gracias al conocimiento de las pendientes de los haces, a cualquier otro plano hallando las intersecciones de los haces con el nuevo plano de interés.

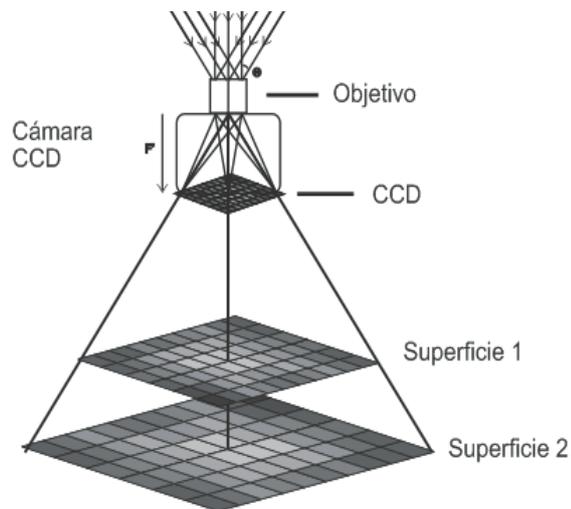


Fig 2.1. Esquema de funcionamiento del sistema óptico con la cámara CCD para obtener la orientación de la luz incidente sobre el dispositivo de medida. La información fotométrica recogida en el sensor CCD puede ser extrapolada a la Superficie 1 y/o la Superficie 2. [POL 2009]

Por otra parte, el dispositivo barre de forma continua la superficie analizada mediante la sincronización de un luxómetro y una cámara digital. Conforme se desplaza el dispositivo, el luxómetro y la cámara, estos van tomando registros en cada punto de medida de forma síncrona.

Para localizar las posiciones de medida, el dispositivo deberá emplear un sistema localizador tipo GPS y un sistema de seguimiento local basado en una cámara adicional que mediante procesamiento de imagen, permita conocer la velocidad y desplazamientos del dispositivo.

Así pues, el objetivo de esta tesis doctoral es desarrollar un algoritmo de propagación de flujo luminoso asociado a unos elementos electrónicos, ópticos y mecánicos caracterizados, capaces de llevar a cabo una metodología de medida para proporcionar, dentro de los márgenes experimentales, los mapas de iluminación de instalaciones de alumbrado público.

Dadas las dimensiones y volumen de las tareas de esta tesis doctoral, los estudios asociados a la medida policromática y la realización de las medidas dinámicas pretenden ser iniciados y estudiados en primera aproximación, pero no forman parte de los objetivos principales de la tesis. No obstante, por completitud a todo el trabajo, se han añadido estas cuestiones en los anexos pertinentes.

Sobre la necesidad del dispositivo

Como se ha dicho anteriormente, el hecho de conocer la cantidad y distribución de luz en el espacio permite abordar una gran variedad de aplicaciones tales como optimizar luminarias destinadas al alumbrado público o detectar posibles carencias o excesos lumínicos que puede provocar efectos no deseados debidos como por ejemplo el propio diseño de las luminarias, espaciado entre ellas o tipos de lámparas empleadas.

La continua demanda de sistemas energéticamente más eficientes está generando dos líneas de actuación dentro del mercado. Por una parte, nuevos sistemas de iluminación más eficientes y por otra, un aumento sistemático de las demandas del mercado referentes a procedimientos para la medida de la cantidad y distribución de luz que llega sobre las superficies.

Actualmente, las normativas asociadas a la medición de la iluminación de las instalaciones de alumbrado público contemplan métodos de medida manuales que resultan costosos en tiempo ya que han de ser realizados manualmente por operarios. Además, el

número de medidas a realizar en una instalación es limitado dadas las dimensiones que presentan las calles de una ciudad.

El dispositivo fotométrico, trabajando con los elementos adecuados y procesando la información fotométrica mediante el algoritmo de propagación de flujo luminoso permitirá realizar un mayor número de medidas. Las medidas serán automatizadas una vez que el algoritmo y la estrategia de medida sean desarrollados, además, la tarea de medir se efectuará en un menor tiempo ya que podrá realizarse en movimiento desde un vehículo.

La información fotométrica obtenida presentará un mayor volumen de información que permitirá tener un conocimiento más adecuado y exacto sobre la iluminación proporcionada por las instalaciones de alumbrado público y se podrán derivar, de esta forma, conclusiones más certeras sobre parámetros como la ergonomía visual o la eficiencia energética.

Ya que la eficiencia energética es uno de los objetivos de fondo sobre los que pretende actuar el trabajo aportado en la presente tesis doctoral, se debe prestar atención a la definición de este concepto:

“la reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir nuestro confort y calidad de vida, protegiendo el medio ambiente”

La eficiencia energética representa un trabajo real y con futuro inmediato de cara a la optimización de las instalaciones de alumbrado que poco a poco van quedando obsoletas. Nuevas tecnologías como el LED lighting, basadas en sistemas de diodos de emisión de luz (LED) que trabajan en combinación con lentes inyectadas en plástico constituyen nuevas alternativas para iluminar más eficientemente, ahorrando energía y generando una menor contaminación lumínica. [Fernández-Dorado 2010, Arasa 2011b]

El efecto más notorio de la contaminación lumínica es el aumento del brillo del cielo nocturno. La luz reflejada y esparcida en la atmósfera contribuye a degradar la visibilidad de estrellas u otros objetos celestes siendo un grave problema para la comunidad astronómica. Consecuencias no menos importantes son la alteración biológica de los ecosistemas nocturnos o la dificultad de la navegación marítima y aérea. Este efecto puede llegar a tener una gran expansión de centenares de kilómetros. Toda la luz enviada hacia el cielo es energía que no es

aprovechada, que molesta y que finalmente, provoca un gran gasto innecesario de recursos energéticos. Por tanto, es totalmente necesario controlar estos aspectos de cara a obtener una iluminación lo más correcta posible en cada uno de los entornos donde sea necesario.

España se sitúa dentro de los tres países europeos con mayor nivel de gasto en iluminación pública. Solo en iluminación de calles, en el año 2007 se gastaron hasta 45 millones de euros en ciudades de las dimensiones de Madrid. [Palma 2007]

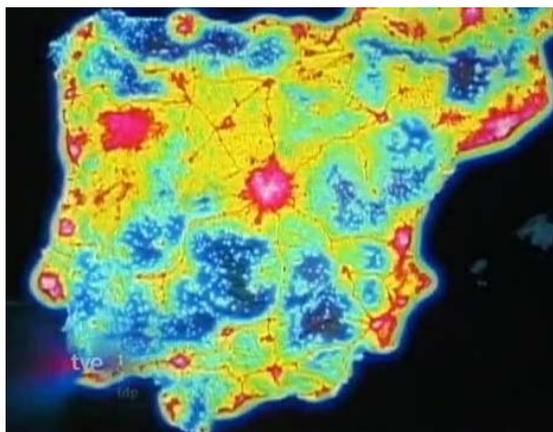


Figura. 2.2. Mapa de análisis de la iluminación en España y Portugal. Las zonas blancas y rojas representan un mayor uso de iluminación de alumbrado público. [RTVE 2011]

Estructura de la tesis

Esta tesis se encuentra dividida en ocho capítulos principales e independientes que serán introducidos por los anteriores a lo largo de todo el texto. El capítulo 1 así como el presente, capítulo 2, han pretendido situar al lector en un marco general de ubicación técnica y práctica sobre los cuales se desarrollará todo el trabajo realizado. En estos dos primeros capítulos se ha explicado brevemente cuáles son las principales claves teórica y prácticas, resaltado las novedades y mejoras que se plantean sobre soluciones anteriores ya consolidadas. También se ha hecho hincapié, de forma somera, sobre las prestaciones que demandan las infraestructuras y la sociedad a nivel de ahorro energético en el sector de la iluminación.

El capítulo 3 sitúa el marco legal de todo el trabajo. Se analizan las normativas vigentes que rigen las medidas fotométricas de las instalaciones de alumbrado público, tanto a nivel

Europeo como a nivel del estado Español. Los procedimientos reglamentados en la normativa son analizados con profundidad de cara a una posterior adaptación de la medida dinámica que es objeto de esta tesis. Se ha hecho un estudio y análisis sobre los distintos equipos y procedimientos que existen hoy en día para medir las propiedades fotométricas de las instalaciones de alumbrado público y una revisión del estado del arte hallado en las publicaciones científicas y técnicas. El apartado del estado del arte terminará con una revisión a los distintos tipos de fuentes luminosas empleados en las instalaciones de alumbrado público.

El capítulo 4 establece la estrategia de medida del dispositivo. Se estudian las ecuaciones radiométricas y fotométricas que son necesarias para el desarrollo del algoritmo de propagación del flujo luminoso. Asimismo se analizan en detalle todos los parámetros que son de interés para el desarrollo de un plan de medidas experimentales que permita obtener conclusiones acertadas sobre toda la estrategia de medida propuesta. El rango dinámico, la respuesta espectral, la interpolación de la información y representación de la misma son los parámetros a tener en cuenta en este capítulo.

El capítulo 5 hace referencia al desarrollo y la validación del algoritmo y los dispositivos necesarios empleados en las medidas experimentales. En primer lugar se describen los componentes empleados agrupados por funcionalidad (ópticos, electrónicos y mecánicos), y se presta atención a todo el proceso de caracterización del instrumental empleado. En segundo lugar, se presta atención al software desarrollado, parte esencial de esta tesis doctoral, para el procesado de la información y obtención de datos fotométricos. Se analiza en detalle el diagrama de bloques y se desarrollan cada una de las etapas que lo conforman.

En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos por el algoritmo en dos casos representativos, el primero en un laboratorio, entorno controlado, y el segundo caso las medidas llevadas a cabo en un entorno exterior con iluminación de alumbrado público. Se analizan las fuentes de error y los gráficos correspondientes en base a medidas de referencia para evaluar las diferencias encontradas entre las medidas consideradas como exactas y las proporcionadas por el algoritmo.

El capítulo 7 expone las conclusiones obtenidas de todo el trabajo de investigación y desarrollo realizados en el equipo, tanto teóricos como prácticos. Se analizan y resumen los problemas encontrados y posibles formas de solucionarlos.

El último capítulo, el 8, sugiere las directrices para proseguir con el trabajo con el fin de incluir mejoras en la depuración del algoritmo, en el procedimiento de medida y en la mejora del dispositivo.

Además, los anexos A y B exponen dos aspectos experimentales que aunque contemplados en la estrategia de medida, no han sido tenidos en cuenta en las medidas experimentales. A saber, la medida policromática de los sistemas de alumbrado público y la capacidad de medición dinámica. El tercer anexo C muestra fotografías del proceso de medida y el último, D, hace referencia a las publicaciones y la financiación de la tesis.

Capítulo 3

Estado del arte

En este capítulo se revisa el estado actual de las técnicas de medida fotométricas empleadas en la obtención de los mapas de iluminación vial así como otras magnitudes fotométricas en instalaciones de alumbrado público. Se presta una especial atención a los dispositivos implicados en la medida a la vez que se repasa en detalle las normativas legales vigentes y los entornos donde deben trabajar los dispositivos de medida.

De esta forma, este capítulo tiene como objetivo ofrecer una perspectiva actual acerca de la tecnología y metodología que se desarrollan en el campo de la medida de la iluminación de alumbrado público.

El capítulo se encuentra dividido en cuatro epígrafes principales. En el primero de ellos se presenta una revisión de los puntos más importantes sobre la normativa de iluminación y eficiencia energética, tanto a nivel europeo como español, dedicando especial atención a la normativa referente a la iluminación vial de carreteras urbanas.

El segundo epígrafe está dedicado a los procedimientos de medida contemplados en la legislación vigente, en este punto se desglosan en detalle las acciones que se han de llevar a cabo, según la normativa, para obtener una correcta medida de la iluminación. Una vez establecido el marco legal en el que se sitúa el trabajo de la presente tesis doctoral, se revisa el instrumental empleado en la medida. Aspectos como su rango de aplicación, precisión o rapidez entre otros son analizados en detalle. Finalmente en el cuarto apartado, se abordan los diferentes tipos de luminarias lámparas, configuraciones y clasificaciones.

3.1.- Legislación vigente sobre las medidas de iluminación de alumbrado público.

El alumbrado es el servicio público consistente en la iluminación de las vías públicas, parques públicos, y demás espacios de libre circulación que no se encuentren a cargo de ninguna persona natural o jurídica de derecho privado o público, diferente del municipio, con el objeto de proporcionar la visibilidad adecuada para el normal desarrollo de las actividades.

La estrategia de medida que se presenta en este trabajo ha sido diseñada especialmente para la medida de la iluminación de las instalaciones de alumbrado público. Así pues, en este capítulo se tratará sobre el reglamento vigente correspondiente a las normativas por las que actualmente se rigen las condiciones de diseño, ejecución, mantenimiento y medida que deben reunir las instalaciones de alumbrado público.

En este sentido, es necesario que las normativas que rigen la medida de las instalaciones de sistemas de alumbrado público velen para que cada uno de los elementos que configuran dichas instalaciones cumplan con la finalidad para la que han sido diseñados y sean por tanto, capaces de iluminar de una forma correcta.

Dependiendo del tipo de ámbito a iluminar, las normativas por las que se rigen los elementos de los sistemas de alumbrado pueden variar de manera importante. Así podemos encontrar diferentes normativas; por ejemplo: normativa para interiores (hospitales), recintos deportivos, zonas de trabajo industrial, carreteras etc. Debido a la extensión de cada una de estas normas, nos centraremos aquí, en analizar los puntos más relevantes que afectan a este trabajo a nivel Europeo y más específicamente, en los textos que afectan de manera directa al estado Español como son el Real Decreto de eficiencia energética 1890 y la normativa vigente de sistemas de alumbrado en carreteras [Real Decreto 1890, UNE-EN 13201-/2/3/4, UNE-EN 13032-1].

3.1.1.- Campo de aplicación

En los próximos años la legislación ya vigente sobre alumbrado público será actualizada (p. ej. Directivas como la asociada a la recogida de aparatos electrónicos y

eléctricos, RAEE o la Restricción del uso de ciertas sustancias peligrosas, cuyas siglas en inglés significan Restriction of use of certain Hazardous Substances, (RoHS).

Directivas más recientes como la referida a los productos que usan energía, del inglés Energy using products (EuP) entrarán en vigor en la Unión Europea (de aquí en adelante UE-27), lo que supondrá la retirada progresiva de los productos ineficientes y la adopción de productos de alumbrado de bajo consumo en este mercado.

La legislación pretende impulsar la implantación de soluciones de valor añadido. Deberá prestarse especial atención a la eficiencia energética, las sustancias peligrosas y la fiabilidad a lo largo de la vida.

Sobre las cuestiones medioambientales relacionadas con la iluminación se comenzó a legislar hace ya más de una década, experimentando un gran auge estos últimos años principalmente en el ámbito de la eficiencia energética. Aproximadamente 2/3 de la iluminación instalada hoy en el mundo utiliza tecnología anticuada e ineficiente para la que hoy ya existe alternativa. La legislación medioambiental abre en este sentido nuevas oportunidades para la renovación del alumbrado.

Las directivas RoHS y RAEE, contribuirán significativamente a reducir las cantidades de sustancias peligrosas emitidas al medio ambiente. La normativa sobre el mercurio y el plomo contempla algunas exenciones en iluminación, basadas en los niveles que se utilizan actualmente en el sector. La razón es que se requiere algo de mercurio para que las lámparas de descarga funcionen eficientemente, así como la ausencia de alternativas técnicas industriales al plomo en determinadas categorías de producto. Una de las principales consecuencias de la directiva RoHS deberá ser la restricción de los productos de baja calidad.

Por otro lado, directivas como RAEE ó EUP, que entraron en vigor a mediados del año 2005, tienen como objetivo evitar o reducir los residuos mediante la reutilización y el reciclado, reduciendo así el impacto medioambiental.

La directiva RAEE se aplica en los 27 estados de la UE más en Noruega y Suiza. Esta directiva está en vigor desde el año 2005 y cubre todas las lámparas de descarga incluidos los equipos de control que también son considerados como parte integrante de la luminaria.

Todos los productos que cumplen con esta normativa son identificados con un distintivo especial.

La directiva EUP fue publicada el 22 de julio de 2005 y en 2008 han sido votadas y aprobadas dos medidas instrumentales específicas sobre iluminación por parte del Consejo Regulador, una referente al sector terciario y otra al alumbrado doméstico (1ª fase). Durante 2009 se elaboraron medidas instrumentales sobre el alumbrado doméstico (2ª fase) que afectan a los requisitos exigidos sobre eficiencia energética a luminarias, reflectores, lámparas y LEDs. [PHILIPS 2009]

3.1.2.- Objetivos: Eficiencia energética y contaminación lumínica.

Actualmente, es una necesidad importante mejorar los sistemas de alumbrado de un amplio espectro de infraestructuras, tanto urbanas como industriales. El objetivo es garantizar más y mejor la seguridad en los trayectos en lo que a transporte o paso de personas y mercancías se refiere. El hecho de garantizar la seguridad mediante una correcta iluminación con los sistemas de alumbrado también está íntimamente relacionado con el concepto de eficiencia energética.

Las normativas están orientadas a fijar unos requisitos mínimos de eficiencia energética que descataloguen automáticamente a aquellos sistemas que no puedan cumplirlos. La iluminación deberá competir con otros sistemas que consumen energía en el mismo ámbito como edificios o instalaciones industriales exteriores, así, su potencial de reducción de consumo será una ventaja muy importante desde el punto de vista económico y medioambiental.

Otro aspecto fundamental y también relacionado con la eficiencia global de los sistemas de alumbrado público es la contaminación lumínica. La emisión de flujo luminoso de las fuentes artificiales nocturnas en cualquier dirección que no sea justo aquellas para las que han sido diseñadas las instalaciones genera problemas cada vez más extendidos en todas las ciudades del mundo. Casos como proyectores y cañones láser, iluminaciones publicitarias o monumentales son algunos ejemplos de sistemas de alumbrado que provocan este efecto.

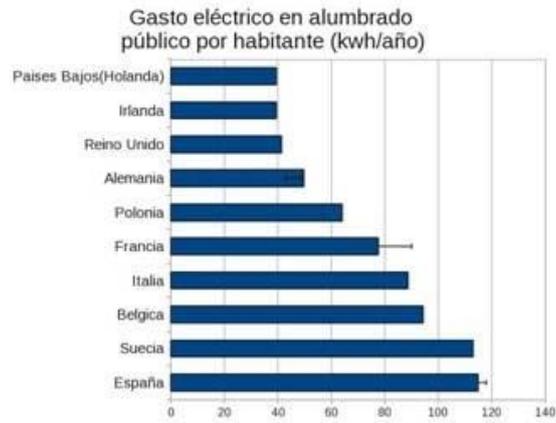


Figura. 3.1.1. Consumo eléctrico en instalaciones de alumbrado público en diez países de la zona de la comunidad económica europea. [Sánchez de Miguel 2010]

A nivel continental, España es uno de los países de Europa más afectados por la contaminación lumínica. Es además, el primero en cuanto a gastos de KWh por habitante con un consumo de 450 millones de euros al año para la iluminación de las calles, ciudades y casas. En países como Alemania, un habitante gasta 45 KWh, mientras que en España se gastan 110 KWh por habitante. Según un estudio de la Comisión, España es el segundo país de la UE que menos bombillas de bajo consumo usa.

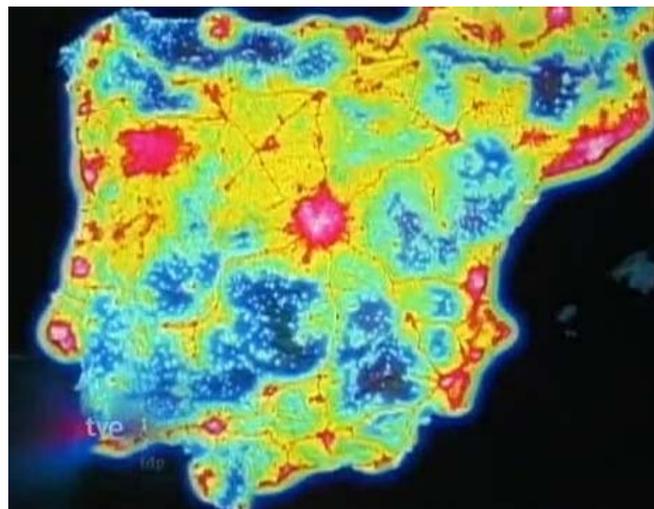


Figura. 3.1.2. Mapa de análisis de la iluminación en España y Portugal. Las grandes urbes contienen el mayor número de gasto en iluminación de las vías públicas. Ciudades como Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao, Alicante o Sevilla son las que mayor contaminación lumínica presentan marcadas en tonos rojos y blancos. [RTVE 2011]

3.1.3.- Legislación española. Real Decreto 1890/2008.

El documento oficial que regula la eficiencia energética en el estado español es el Real Decreto 1890 aprobado en Noviembre de 2008. El documento consta de 16 artículos y 7 Instrucciones técnicas complementarias, todas ellas basadas en las normativas europeas anteriormente expuestas así como otras normativas no contempladas en este texto por su falta de conexión con el objetivo de este trabajo.

Aunque ya existían algunos antecedentes normativos de carácter parcial sobre el aspecto normativo relativo al alumbrado exterior, éstos presentaban ciertas limitaciones, bien por su objetivo, como por ejemplo, la Ley del 31/1988 sobre protección de la calidad astronómica de los observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias o bien por restringirse al ámbito de la Comunidad Autónoma o Ayuntamiento que los promulgó. [REAL DECRETO 1890]

En consecuencia, se ha considerado conveniente y necesario abordar el problema de la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado exterior eléctrico, de manera general para todo el territorio Español.

Objetivos y campos de aplicación

El principal objetivo por tanto, no es otro que conseguir un uso racional de la energía y disminuir al máximo la contaminación lumínica, factores que suponen impactos muy negativos sobre el medio ambiente. Así, el Real Decreto 1890 se constituye como un texto necesario para afianzar los objetivos prioritarios para cualquier economía relacionada con el consumo de energía para el alumbrado exterior al mismo tiempo que se permita el normal desarrollo de cualquier actividad dependiente de los recursos involucrados en cada proceso productivo. [Real Decreto 18/90/2008]

Los 16 artículos del Real Decreto establecen las condiciones técnicas de diseño, ejecución y mantenimiento que deben reunir las instalaciones de alumbrado exterior con la finalidad de mejorar la eficiencia y ahorro energético así como reducir la contaminación lumínica y la emisión de gases de efecto invernadero.

El reglamento hace distinción entre seis tipos diferentes de alumbrado exterior a los que será aplicado:

- Vial (Funcional y ambiental)
- Específico
- Ornamental
- Vigilancia y seguridad nocturna
- Señales y anuncios luminosos
- Festivo y navideño

De los seis tipos, se hará hincapié en el primero, que no es otro sino para el cual ha sido especialmente diseñada la estrategia de medida que se presenta en esta tesis doctoral. El reglamento de eficiencia energética también establece un artículo de definiciones sobre los distintos parámetros fotométricos que se han de tener en cuenta de cara a una medida de alumbrado exterior como es el alumbrado vial. También se establecen las normas por las cuales se acotan los niveles máximos de iluminación para cada tipo de instalación, los requisitos mínimos de eficiencia energética, nivel de deslumbramiento, régimen de comportamiento de las instalaciones etc.

Por último, se determinan las pautas a seguir para la correcta documentación de las instalaciones, su ejecución y puesta en servicio así como su mantenimiento, verificaciones e inspecciones pertinentes.

Aunque como ya se ha comentado, existen diferentes tipos de alumbrado exterior, todos ellos están regidos por una serie de normativas comunes para poder realizar su caracterización. Para ello, el reglamento de eficiencia energética va acompañado de siete documentos de instrucciones técnicas complementarias para llevar a cabo la caracterización de las instalaciones de acuerdo a las normativas que rigen en toda la Unión Europea. [ITC 2008]

Instrucciones técnicas complementarias

Como ya se ha comentado anteriormente, existe la necesidad importante de mejorar los sistemas de alumbrado de diversos tipos de infraestructuras, tanto a nivel urbano como

industrial. Las nuevas tecnologías y los nuevos diseños tienen por objetivo garantizar más y mejor la seguridad referida a la iluminación.

A pesar de que cada tipo de luminaria ha de cumplir unas pautas regladas específicas para cada tipo de alumbrado en cuanto a su distribución fotométrica, eficiencia, deslumbramiento, etc, existen una serie de instrucciones comunes para las medidas luminotécnicas de todos estos dispositivos se refiere. De esta forma, la normativa española, mediante las Instrucciones Técnicas Complementarias referentes al Real Decreto comentado anteriormente describe las medidas luminotécnicas correspondientes a las verificaciones e inspecciones de las instalaciones de alumbrado exterior y más concretamente, en el alumbrado vial.

A continuación, se exponen, de manera resumida, los aspectos y parámetros a tener en cuenta para realizar la caracterización de una instalación de alumbrado público: comprobaciones previas, medida de luminancia, medida de iluminación, deslumbramiento perturbador y eficiencia energética.

Si bien no todas estas consideraciones han sido implementadas en esta tesis doctoral, su exposición, de manera breve en estas páginas, aporta completitud de información a la memoria. El análisis detallado de las ecuaciones, razonamientos físicos y los cálculos matemáticos necesarios para la ejecución del trabajo experimental de esta tesis, quedarán desarrollados completamente en el capítulo 4.

Comprobaciones de validez para las medidas

Se deben comprobar cuatro puntos esenciales para verificar la validez de las medidas fotométricas de cualquier instalación de alumbrado vial. Estos puntos son los siguientes:

i) Geometría de la instalación.

La distancia entre los puntos de luz, la altura de montaje de dichos puntos, la longitud saliente del brazo donde se encuentran su inclinación y las dimensiones de los arcenes, medianas etc. Todos estos parámetros deben ser constantes en una instalación de alumbrado para llevar a cabo correctamente la medida. [ITC-EA-01 2008]

ii) Tensión de alimentación.

La tensión eléctrica de la instalación se realizará mediante un voltímetro registrador o mediante medidas periódicas de la tensión cada 30 minutos. [ITC-EA-07 2008]

iii) Influencia de otras instalaciones.

Las únicas luminarias que podrán estar encendidas serán aquellas que son objeto de medida, debiéndose apagar cualquier otra fuente luminosa cercana a la zona de medida. [ITC-EA-07 2008]

iv) Condiciones meteorológicas.

Las condiciones meteorológicas necesarias para la medida son tiempo seco y pavimentos limpios. No serán válidas las medidas hechas con bruma o niebla. [ITC-EA-07 2008]

Medida de luminancias

La luminancia en un punto de la calzada se obtiene mediante la fórmula:

$$L = \sum \left(I \cdot \frac{r}{h^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.1.1}$$

Donde \sum comprende todas las luminarias de la instalación considerada. Los valores de la intensidad luminosa I y del coeficiente de luminancia reducido r se obtienen por interpolación cuadrática en la matriz de intensidades de la luminaria y en la tabla de reflexión del pavimento. Finalmente, h es la altura de la luminaria.

La medida de la luminancia media se realizará utilizando un luminancímetro integrador. Para un mayor detalle sobre como realizar las medidas de luminancia, consúltese la Instrucción Técnica Complementaria número 7 del Real Decreto de Eficiencia Energética. [ITC-EA-07 2008]

Medida de la iluminación

La iluminación horizontal, de ahora en adelante iluminación, en un punto de la calzada se expresa mediante:

$$E = \sum \left(\frac{I \cdot \cos^3(\gamma)}{h^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.1.2}$$

Siendo I la intensidad luminosa, γ el ángulo formado por la dirección de incidencia en el punto con la vertical y h la altura de la luminaria. El sumatorio comprende todas las luminarias de la instalación. La medida de la iluminación puntual se realizará utilizando un iluminancímetro, también denominado luxómetro. Los puntos de medida de la iluminación corresponderán al conjunto de puntos en los que en el proyecto se han seleccionado para calcular los valores de iluminación. Se trata por tanto de una retícula que cubrirá el tramo de superficie iluminada comprendido entre dos luminarias.

[ITC-EA-07 2008]

La iluminación es la magnitud principal con la que se trabajará a lo largo de esta tesis doctoral. La formulación y el método experimental para su determinación son abordados en profundidad en el capítulo 4.

Deslumbramiento perturbador

El deslumbramiento perturbador es especialmente importante en los viales que corresponden a aquellas calzadas que soportan un tráfico de vehículos importante a velocidades altas. La medida del deslumbramiento perturbador se basa en el cálculo de la magnitud denominada luminancia de velo.

$$L_v = 10 \cdot \sum \left(\frac{E_g}{\theta^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.1.3}$$

Donde E_g es la iluminación producida en el ojo en un plano perpendicular a la línea de visión, y θ es el ángulo entre la dirección de incidencia de la luz en el ojo y la dirección de observación. El sumatorio se extiende a todas las luminarias de la instalación.

Para un mayor detalle sobre como realizar las medidas del deslumbramiento, consúltese la Instrucción Técnica Complementaria número 7 del Real Decreto de Eficiencia Energética referenciado en la bibliografía como [ITC-EA-07 2008].

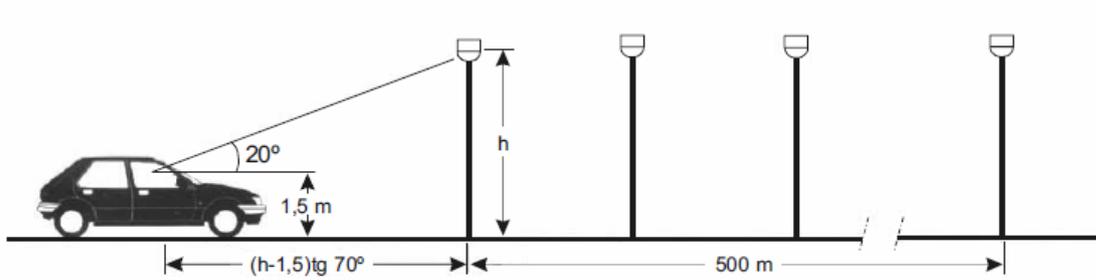


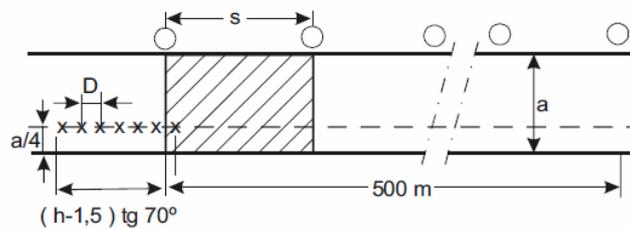
Figura 3.1.3 luminancia que se tiene en cuenta para el cálculo del deslumbramiento perturbador.

A partir del cálculo de la luminancia de velo, se determina el parámetro que establece los límites máximos de deslumbramiento perturbador que produce una instalación de alumbrado. A este parámetro se le denomina incremento del umbral de percepción y se calcula según la expresión:

$$TI = 65 \frac{L_v}{(L_m)^{0.8}} \quad \text{Ecuación 3.1.4}$$

La posición del observador se define tanto en altura como en dirección longitudinal y transversal a la dirección de las luminarias.

A partir de esta posición se calcula la suma de las luminancias de velo producidas por la primera luminaria en la dirección de observación y las luminarias siguientes hasta una distancia de 500m. [ITC-EA-07 2008]



- Luminarias a tener en cuenta para el cálculo de L_v
- × Posiciones del observador

Figura 3.1.4 posiciones del observador para el cálculo del deslumbramiento perturbador.

Para un mayor detalle sobre como realizar las medidas del deslumbramiento, consúltese la Instrucción Técnica Complementaria número 7 del Real Decreto de Eficiencia Energética referenciado en la bibliografía como [ITC-EA-07 2008].

Eficiencia Energética

La eficiencia energética de una instalación se define como:

$$\varepsilon = \frac{S \cdot E_m}{P} \quad \text{Ecuación 3.1.5}$$

Donde S es la superficie iluminada, E_m la iluminación media en servicio de la instalación y P la potencia activa total instalada. Este parámetro también puede calcularse los siguientes factores:

$$\varepsilon = \varepsilon_L \cdot f_m \cdot f_u \quad \text{Ecuación 3.1.6}$$

Donde ε_L es la eficiencia de las lámparas y equipos auxiliares, f_m y f_u son el factor de mantenimiento de la instalación y el factor de utilización de la instalación medido respectivamente en valores por unidad.

Los requisitos mínimos de eficiencia energética exigidos a instalaciones de alumbrado vial funcional son:

Iluminación media en servicio E_m (lux)	Eficiencia energética mínima ε $\left(\frac{m^2 \cdot lux}{W} \right)$
≥ 30	22
25	20
20	17.5
15	15
10	12
≤ 7.5	9.5

Tabla 3.1.1

A partir de los dos parámetros anteriores, se define el índice de eficiencia energética a partir de la relación:

$$I_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \quad \text{Ecuación 3.1.7}$$

Donde ε es el valor de eficiencia energética de la instalación y ε_R el valor de referencia mínimo que debiera presentar. Así se puede expresar en la siguiente tabla los valores de ε_R :

Iluminación medida en servicio $E_m (lux)$	Eficiencia energética mínima de referencia $\varepsilon_R \left(\frac{m^2 \cdot lux}{W} \right)$
≥ 30	32
25	29
20	26
15	23
10	18
≤ 7.5	14

Tabla 3.1.2

Con objeto de facilitar la comprensión sobre la calificación energética de la instalación del alumbrado, se define una etiqueta que caracteriza el consumo de energía mediante una escala de siete letras que va desde la letra A (más eficiente y menor consumo energético) a la letra G (menos eficiente y más consumo de energía). El índice utilizado para genera las escalas de letras es el índice de consumo energético (ICE) que es igual al inverso del índice de eficiencia energética:

$$ICE = \frac{1}{I_{\varepsilon}} \quad \text{Ecuación 3.1.8}$$

Así pues, la tabla 3.1.3 de calificación energética de una instalación de alumbrado queda de la siguiente forma:

Calificación energética	Índice de consumo energético	Índice de Eficiencia energética
A	ICE < 0.91	$I_{\varepsilon} > 1.1$
B	$0.91 \leq \text{ICE} < 1.09$	$1.1 \geq I_{\varepsilon} > 0.92$
C	$1.09 \leq \text{ICE} < 1.35$	$0.92 \geq I_{\varepsilon} > 0.74$
D	$1.35 \leq \text{ICE} < 1.79$	$0.74 \geq I_{\varepsilon} > 0.56$
E	$1.79 \leq \text{ICE} < 2.63$	$0.56 \geq I_{\varepsilon} > 0.38$
F	$2.63 \leq \text{ICE} < 5.00$	$0.38 \geq I_{\varepsilon} > 0.20$
G	ICE ≥ 5.00	$I_{\varepsilon} \leq 0.20$

Tabla 3.1.3 [ITC-EA-01 2008]

3.2.- Procedimientos reglamentados de la medida de la iluminación

En el apartado anterior se han descrito los parámetros principales a los que hace referencia el Real Decreto 1890/2008 que son susceptibles de ser medidos en la planificación, verificación y certificación de las instalaciones de alumbrado público. Nos centraremos ahora en el parámetro correspondiente a la iluminación.

Se muestra a continuación qué procedimientos están contemplados en la legislación actual. Se separan los procedimientos reglamentados en dos categorías, estáticos y dinámicos. Además, se tendrán en cuenta aquí los parámetros empleados y las diferentes geometrías de las instalaciones de alumbrado. Cobra especial interés el procedimiento dinámico en la obtención de la iluminación, ya que este es uno de los objetivos principales de esta tesis doctoral.

3.2.1.- Medida estática de la iluminación. Retícula de medida.

En el punto 3.1.3.2 se ha definido la iluminación a través de la expresión

$$E = \sum \left(\frac{I \cdot \cos^3(\gamma)}{h^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.2.1}$$

Para la medida estática de la iluminación en una instalación de alumbrado público, se ha de seleccionar una retícula que indica los puntos donde debe realizarse la medida. Dicha

retícula cubre la superficie comprendida entre las luminarias consecutivas de la instalación. La siguiente figura muestra la disposición geométrica de los puntos de medida de la iluminación según la retícula establecida.

Los puntos de medida se dispondrán uniformemente separados y cubriendo toda el área aplicable, como se muestra en la figura, donde D no puede ser superior a 3m y d no puede ser superior a 1m. El mínimo de puntos en la dirección longitudinal N será de 3.

Finalmente, un último parámetro debe ser tenido en cuenta. Este parámetro es el llamado área límite. Se considera área límite a una superficie circular en torno a cada punto de medida cuyo radio es cinco veces la altura de montaje h de las luminarias de la instalación considerada. Dentro del área límite, cualquier luminaria que no pertenezca a la instalación que es objeto de la medida deberá ser apagada.

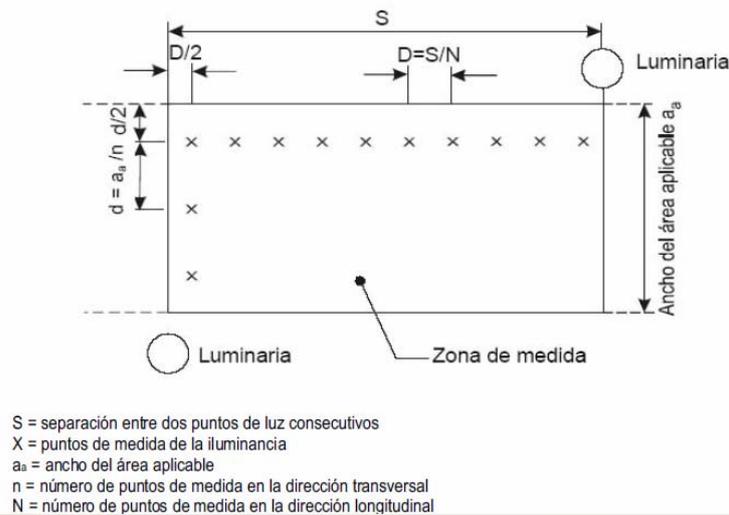


Figura 3.2.1 Puntos de medida para la iluminancia según los informes técnicos reglamentarios que contempla el Real Decreto 1890. [ITC-EA-07 2008]

La gran cantidad de puntos de medida que pueden llevar a conformar la retícula de medida en la mayoría de los casos, puede derivar en una ardua, repetitiva y lenta tarea que en muchos casos exige una considerable cantidad de recursos humanos. Para abordar esta problemática, la normativa contempla otro método alternativo y más simplificado que el anterior llamado método de los nueve puntos. Este punto no sólo es útil en instalaciones donde la retícula de medida presenta una gran cantidad de datos sino también en instalaciones con geometrías variables como puede ser el caso concreto, recogido en las instrucciones técnicas complementarias, de las glorietas u otros entornos.

A partir de la medida de la iluminancia, es posible obtener los datos de la iluminancia mínima, la iluminancia media, la media aritmética de dicha magnitud y la uniformidad media. La uniformidad media se define como el cociente entre el valor mínimo de iluminancia y el valor de iluminancia media, a partir de estos parámetros es posible evaluar la calidad de la instalación de alumbrado público.

3.2.2.- Método de los nueve puntos.

Existe otro método contemplado en la normativa para determinar, de una manera estándar y más simple que la anterior, la iluminación así como la uniformidad media y general o extrema. El método se denomina Método de los nueve puntos.

A partir de la medida de la iluminancia en quince puntos de la calzada (figura 3.2.2), se determinará la iluminancia media horizontal mediante una media ponderada, de acuerdo al método de los nueve puntos. Mediante el luxómetro se mide la iluminancia en los quince puntos resultantes de la intersección de las abscisas B, C, D con las ordenadas 1, 2, 3, 4 y 5 de la figura 3.2.2.

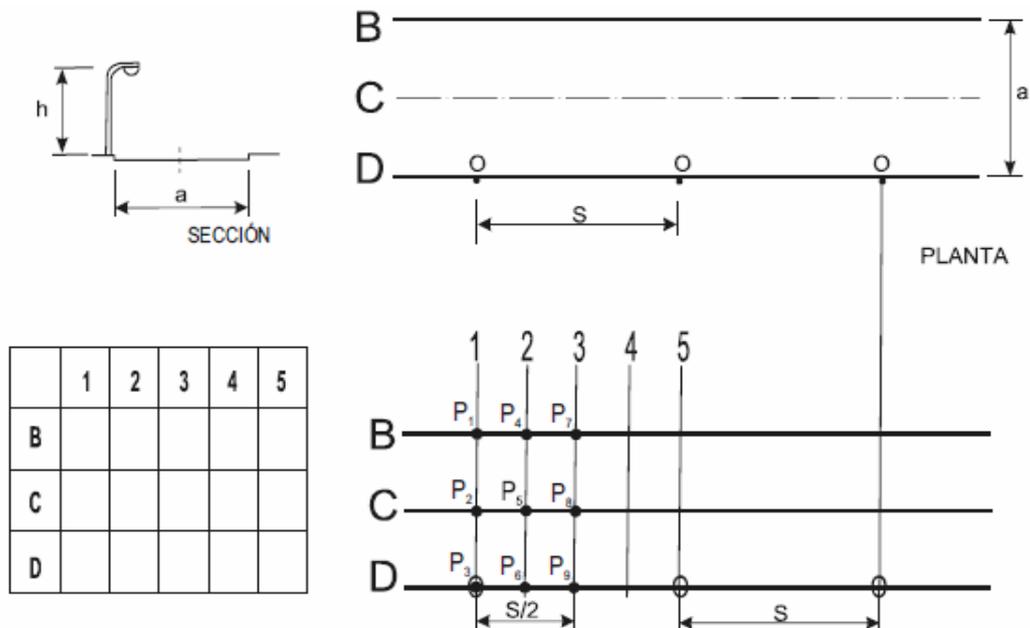


Figura 3.2.2 Determinación de la iluminancia media y uniformidades mediante el método de los nueve puntos. Con estos parámetros, se evalúa la calidad de la iluminación de una instalación de vía pública.

[ITC-EA-07 2008]

Si las luminarias presentan una determinada inclinación, se debe adoptar como medida real de la iluminancia en el punto teórico P_1 la media aritmética de las medidas obtenidas en los puntos $B1$ y $B5$ y así sucesivamente, tal y como consta en las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 E1 &= \frac{(B1 + B5)}{2} & E5 &= \frac{(C2 + C4)}{2} \\
 E2 &= \frac{(C1 + C5)}{2} & E6 &= \frac{(D2 + D4)}{2} \\
 E3 &= \frac{(D1 + D5)}{2} & E7 &= B3 \\
 E4 &= \frac{(B2 + B4)}{2} & E8 &= C3 \\
 & & E9 &= D3
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 3.2.2}$$

De esta forma, la iluminancia media es la siguiente:

$$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16}
 \tag{Ecuación 3.2.3}$$

finalmente, por un lado, la uniformidad media U_m de iluminancia, es el cociente entre el valor mínimo de las iluminancias E_i calculadas anteriormente y la iluminancia media E_m , mientras que la uniformidad general o extrema U_g , se calcula dividiendo el valor mínimo de las iluminancias E_i entre el valor máximo de dichas iluminancias.

3.2.3.- Método para la medida de la iluminación en glorietas.

La medida de la iluminación es probablemente la magnitud más importante a determinar por una instalación de alumbrado vial, pues de ésta se deriva la uniformidad del alumbrado, la ergonomía visual de la vía y por tanto, la seguridad de la misma. Las glorietas son un caso particular, su retícula de medida queda representada en la figura 3.2.3.

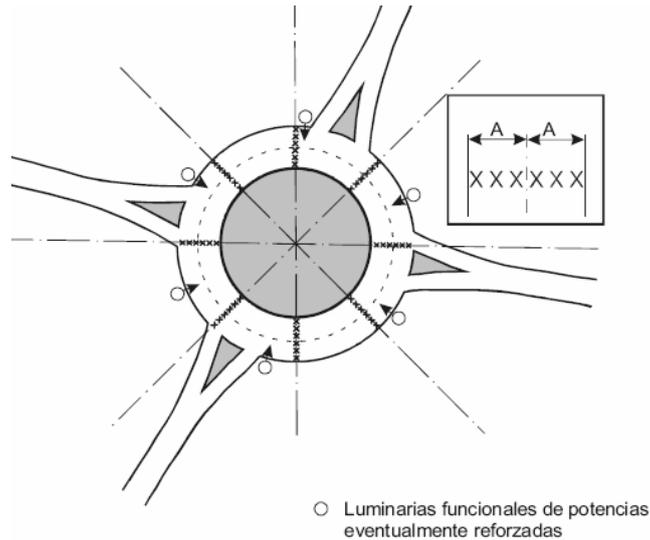


Figura 3.2.3. Retícula de cálculo y mediciones en glorietas. [ITC-EA-07 2008]

La retícula consta de 8 radios con origen en el centro de la glorieta formando ángulos de 45° entre ellos. El origen angular es elegido de manera arbitraria. Cada radio debe presentar 3 puntos de medida de la iluminancia por cada carril que atraviese.

Por tanto, teniendo estas pautas en cuenta, la iluminancia media para una glorieta se calcula de manera sencilla mediante la expresión:

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} E_i \quad \text{Ecuación 3.2.4}$$

La uniformidad media de iluminancia horizontal para las calzadas genéricas, se obtendrá, como el cociente entre el valor más pequeño de la iluminancia puntual y la iluminancia media.

3.2.4.- Método de medida para la iluminación en áreas de forma irregular.

Para realizar la medida de la iluminación en este tipo de áreas, es necesario seleccionar un campo de cálculo de la medida rectangular que contenga al área en cuestión. Los puntos de la retícula usados serán aquellos que se encuentran dentro de los límites del área que es objeto de la medida. Además, cuando la separación de las luminarias no sea regular es posible que la separación de los puntos de medida en la retícula no sea regular, en tal caso, la norma establece como máximo una separación entre puntos de medida de 1.5m. [ITC-EA-07 2008]

3.2.5.- Método dinámico de la medida de la iluminación.

La medida dinámica de la iluminación puede hacer impracticable la geometría y ubicación de los puntos de la cuadrícula comentada en las medidas estáticas. Existe además otra diferencia con las medidas estáticas y es que en el caso de las medidas dinámicas, el número de puntos de medida vuelve a aumentar.

La normativa UNE EN 13201-4 establece tres puntos fundamentales que han de cumplirse para llevar a cabo las medidas de forma dinámica:

- a) Presentar una relación unívoca entre la posición de la cabeza fotométrica y el punto de medida en relación con unos orígenes de coordenadas que permitan conocer sin ambigüedades, el punto y su medida correspondiente.
- b) Minimizar cualquier posible efecto perturbador de la medida debido al vehículo usado. El ruido electrónico o las sombras o posibles reflexiones de la luz son algunos de estos aspectos.
- c) Las cabezas fotométricas deben estar calibradas y presentar todas las características recogidas en la norma.

El primer punto a cumplir en la medida dinámica, plantea el uso común de sistemas de navegación globales tipo GPS, con este tipo de sistemas, los vehículos están posicionados con respecto a las coordenadas globales según las cartas cartográficas de las que esté haciendo uso el dispositivo GPS. El error de posicionamiento de este tipo de sistemas se encuentra alrededor de unos ± 5 m de distancia. Dependiendo del tramo a medir, esta cantidad puede ser significativa, pues si el error es acumulado, podría desplazar notablemente las medidas fotométricas realizadas alterando el resultado.

Otro inconveniente que plantean los sistemas GPS es que la señal de detección no está presente en pasos subterráneos o túneles, lo que hace prácticamente imposible conocer con una exactitud razonable la relación entre los puntos de medida y la lectura fotométrica realizada.

En cuanto a la altura de la cabeza fotométrica, ésta debe situarse siempre en el plano del suelo pero dado que las medidas dinámicas plantean el uso de un vehículo a una cierta

velocidad, se considera la posibilidad de realizar las medidas a una altura del plano del suelo de 200mm. [UNE EN 13201-4]

Por consiguiente, se debe idear en esta forma de medida un método para relacionar la posición geométrica de registro con las posiciones de puntos de medida y conocer la incertidumbre en la relación entre la posición geométrica del instrumento de registro y el propio valor registrado.

El segundo punto establecido anteriormente, hace referencia a las posibles interferencias que el vehículo pueda tener con el sistema de medida. Las cabezas fotométricas son elementos integradores que transforman toda la luz incidente sobre ellos en una respuesta electrónica. Dado que no es posible distinguir la procedencia de la luz, cualquier pequeña sombra, brillo o evento lumínico puede falsear la medida de la cabeza fotométrica. Éste es un problema que puede resolverse si la cabeza fotométrica se sitúa en la parte superior del vehículo aunque hay que tener en cuenta que entonces, se estará a una altura superior a la estipulada por la norma (200mm) y que por tanto, se corre el riesgo de obtener medidas fotométricas erróneas. De esta forma, se ha de establecer un método que permita descontar las sombras y/o reflejos provocados por el vehículo y tener en cuenta cualquier otra posible causa de error.

Finalmente, el último punto hace referencia a las exigencias técnicas que todo luxómetro debe cumplir para ser utilizado, tanto en medidas dinámicas como estáticas. Características como la curva de respuesta espectral, la respuesta en coseno o la dependencia con la temperatura entre otras, son algunas de las especificaciones técnicas que han de estar aprobadas en el dispositivo por un laboratorio que avale las herramientas de medida. En el siguiente apartado se detallarán los tipos de dispositivos empleados para realizar las medidas fotométricas y se analizarán todas las características de interés en la medida fotométrica planteada en este trabajo. [UNE EN 13201-4]

3.3.- Equipos fotométricos de medida actuales.

Dado que la presente tesis doctoral es fundamentalmente un trabajo de investigación de ingeniería óptica, es de máximo interés prestar atención a las diferentes soluciones técnicas

que existen, tanto a nivel de desarrollo como de producto comercial, en relación a las medidas fotométricas de instalaciones de alumbrado público.

En primer lugar, se analizan en este apartado los parámetros de los equipos contemplados por la normativa que han de ser tenidos en cuenta en la medida de la iluminación por parte de todos los dispositivos en ella empleados. Se continuará con el análisis de los dispositivos y productos comerciales existentes en el mercado que son aptos para la realización de las medidas de la iluminación propuestas en esta tesis doctoral y finalmente se abordan trabajos de I+D hallados en la bibliografía que plantean distintas soluciones a las medidas de la fotometría en instalaciones de alumbrado público.

3.3.1.- Parámetros fotométricos fundamentales de los luxómetros.

La norma UNE-EN 13032-1 establece las exigencias que los luxómetros, en el laboratorio deben cumplir para realizar las medidas fotométricas de forma adecuada. En este apartado se resumen los parámetros de interés para este trabajo.

La siguiente lista presenta los parámetros técnicos que son tenidos en cuenta en la estrategia de medida fotométrica. Aunque estos parámetros son contemplados en el laboratorio por la norma, deben ser igualmente exigidos para dispositivos que realicen las medidas en el propio campo de medida, es decir, en las instalaciones de alumbrado público.

- i) Curva fotométrica espectral relativa al sistema visual humano
- ii) Respuesta direccional
- iii) Linealidad
- iv) Fatiga
- v) Dependencia con la temperatura
- vi) Cambio de intervalo

i) Curva fotométrica espectral relativa al sistema visual humano

Ha de existir un grado de correspondencia entre la respuesta espectral relativa del luxómetro y la eficiencia luminosa espectral del sistema visual humano. El parámetro que cuantifica dicha correspondencia es f_1 y se calcula como se indica en la ecuación 3.3.1.

$$s_{rel}^*(\lambda) = s_{rel}(\lambda) \times \frac{\int_0^{\infty} S_A(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_A(\lambda) \times s_{rel}(\lambda) d\lambda} \rightarrow f_1 = \frac{\int_0^{\infty} |s_{rel}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} V(\lambda) d\lambda} \quad \text{Ecuación 3.3.1}$$

Donde:

$s_{rel}^*(\lambda)$ es la respuesta espectral relativa normalizada del luxómetro

$S_A(\lambda)$ es la distribución espectral del iluminante usado en la calibración.

$s_{rel}(\lambda)$ es la respuesta espectral relativa con una referencia arbitraria del luxómetro.

$V(\lambda)$ es la eficiencia luminosa espectral del sistema visual humano para visión fotópica.



Figura 3.3.1. Ejemplo de fotodiodo, modelo S9219 de Hamamatsu, con filtro de respuesta fotópica que simula la curva de respuesta espectral del sistema visual humano. [Hamamatsu 2012]

ii) Respuesta direccional

Cuando la luz incide sobre la superficie de recepción de la cabeza fotométrica, la respuesta del dispositivo depende del propio ángulo de incidencia.



Figura 3.3.2. Cabeza fotométrica que dispone de un difusor protegido por una cápsula semiesférica. [Gossen 2012 a]

La desviación de la respuesta en función de la dirección viene dada a partir de la expresión:

$$f_2 = \frac{Y(\varepsilon, \varphi)}{Y(0, \varphi) \times \cos \varepsilon} - 1 \quad \text{Ecuación 3.3.2}$$

Donde:

$Y(\varepsilon, \varphi)$ es la señal de salida en función del ángulo de incidencia.

ε es el ángulo medido con relación a la normal al plano de medida, ángulo de elevación.

φ es el ángulo azimutal.

iii) Linealidad

La linealidad de un detector se obtiene calculando la proporción existente entre la magnitud de salida del detector y la magnitud de entrada. Para caracterizar la posible desviación de la linealidad de los fotómetros, se emplea la siguiente expresión:

$$f_3 = \frac{Y}{Y_{\max}} \times \frac{X}{X_{\max}} - 1 \quad \text{Ecuación 3.3.3}$$

Donde:

Y es la señal de salida debida a la iluminación del fotómetro en relación a una magnitud de entrada X .

X_{\max} es el valor de entrada correspondiente a la señal de salida máxima Y_{\max} .

iv) Fatiga

La fatiga es el cambio temporal que se produce en condiciones de medida constantes. Los cambios son producidos por la iluminación recibida sobre el fotómetro. La fatiga es mayor cuanto mayor es la iluminación recibida sobre el fotómetro. Este parámetro se puede calcular a lo largo del tiempo a partir de la siguiente expresión:

$$f_4(t) = \frac{Y(t)}{Y(t_0 = 10s)} - 1 \quad \text{Ecuación 3.3.4}$$

Donde:

t es el tiempo transcurrido desde el comienzo de la iluminación de la cabeza del fotómetro con iluminación constante.

$Y(t)$ es la señal de salida en el instante t .

t_0 la lectura comienza 10 segundos después de la iluminación, estos diez segundos son un tiempo de referencia.

v) Dependencia con la temperatura

La temperatura puede ser un factor determinante para realizar correctamente las medidas fotométricas. Si el dispositivo trabaja a una temperatura ambiente diferente de la usada durante la calibración, pueden ocurrir errores de medida y por tanto, se ha de evaluar el grado de incidencia de la temperatura en el dispositivo. De la misma forma que en los puntos anteriores, dicha dependencia puede evaluarse mediante una función del tipo:

$$f_5(T) = \frac{Y(T_2) - Y(T_1)}{Y(T_0)} \times \frac{\Delta T}{T_2 - T_1} \quad \text{Ecuación 3.3.5}$$

Donde:

$Y(T)$ es la señal de salida a la temperatura T ;

$Y(T_0)$ es la señal para la temperatura ambiente de referencia 25°C.

$T_2, T_1, \Delta T$ son 40°C, 0°C y 2°C respectivamente.

vi) Cambio de intervalo

Aunque en la normativa se denomina cambio de intervalo, este parámetro también es conocido como rango dinámico de medida o simplemente, rango dinámico. El rango dinámico establece el valor mínimo y máximo que puede llegar a medir el luxómetro. Normalmente, los luxómetros tienen varios intervalos de medida.

Existe una desviación debida al cambio de intervalos de medida que se produce cuando se cambia de un intervalo a otro adyacente.

La desviación que puede existir debida a este hecho puede cuantificarse a través de la expresión:

$$f_6 = \left| \frac{Y_B}{k \times Y_A} - 1 \right| \quad \text{Ecuación 3.3.6}$$

Donde:

k Es una constante tabulada.

Y_A Es la lectura en el intervalo A para una magnitud de entrada X_A que corresponda al 90% de la escala máxima.

Y_B Es la lectura del siguiente intervalo mayor para una magnitud de entrada X_B que es k veces mayor que X_A .

Las funciones que caracterizan la desviación de la medida para cada fotómetro deben presentar, en todos los casos, un valor inferior a unos límites establecidos que se recogen en la siguiente tabla:

Parámetro	Símbolo	Valor máximo
Curva fotométrica espectral relativa al sistema visual humano	f_1	1.5%
Respuesta direccional	f_2	1.5%
Linealidad	f_3	0.2%
Fatiga	f_4	0.1%
Dependencia con la temperatura	f_5	0.2%
Cambio de intervalo	f_6	0.1%

Tabla 3.3.1 [UNE-EN 13032-1]

3.3.2.- Dispositivos empleados en la medida de la iluminación.

Los dispositivos utilizados para la medida de la iluminación en instalaciones de alumbrado público son los fotómetros, más concretamente, denominados como luxómetros. Dado que la iluminación es una magnitud derivada, ésta puede obtenerse a partir de la medida

de otras magnitudes tales como la luminancia. En este sentido, los luminancímetros son otra opción correcta para poder obtener una medida de la iluminación.

Existe una gran diversidad de métodos y dispositivos para realizar las medidas de la iluminación en instalaciones de alumbrado público. En algunos casos, como se ha comentado en el párrafo anterior, se hace uso de luminancímetros, en otros de luxómetros e incluso llegan a combinarse varios tipos de dispositivos basados en los dos anteriores trabajando conjuntamente con otros sistemas basados en cámaras CDD y sensores de silicio.

La complejidad que presentan los entornos de trabajo en los que está enmarcada esta tesis doctoral y la necesidad de medir no solo la iluminación sino también otro tipo de magnitudes esenciales para el confort visual, la ergonomía óptica de los usuarios finales de las infraestructuras y la optimización y eficiencia de los propios sistemas de iluminación requiere que, a menudo, se combinen distintas tecnologías y estrategias de medida.

DISPOSITIVO	TECNOLOGÍA	ÁMBITO PRINCIPAL	MAGNITUD	APLICACIONES
Fotómetros industriales	Fotodiodo de silicio	I+D, laboratorio	Iluminación luminancia irradiancia radiancia.	Fotometría en ambientes controlados
Fotómetros portátiles	Célula fotovoltaica	Fotografía	Iluminación	Fotometría para trabajo artístico Iluminación de carreteras
Fotómetros de luz reflejada	Cámaras CCD	Ingeniería, fotografía, streetlighting	Luminancia	Paneles indicadores
Fotodiodos	Célula fotovoltaica	I+D Ingeniería Laboratorio	Iluminación	Fotometría Smart-cities
Videofotómetros	Cámaras CCD, CMOS	Ingeniería streetlighting	Luminancia	Confort visual ergonomía óptica Señalización Colorimetría
Dispositivos combinados	Cámaras CCD, células fotovoltaicas, fotodiodos	Ingeniería óptica Procesado de imagen	Iluminación luminancia irradiancia radiancia T color	Confort visual ergonomía óptica Señalización Colorimetría

Tabla 3.3.2

La tabla 3.3.2 muestra de forma resumida el tipo de dispositivos con los que se trabaja en la actualidad, indica qué tecnologías son las empleadas y a qué ámbitos y aplicaciones principales están destinados.

Fotómetros industriales

De la tabla anterior, los dispositivos quizás menos apropiados para la realización de medidas en instalaciones de alumbrado público, por sus dimensiones y forma de uso, sean los fotómetros industriales empleados en laboratorios, aunque por otro lado presentan una gran precisión y sensibilidad además de un amplio rango dinámico de medida. Este tipo de fotómetros realizan la medida a través de cabezales previamente calibrados que integran la radiación recibida. Dichos cabezales se intercambian según la magnitud radiométrica o fotométrica que se desee medir. La figura 3.3.3 presenta un tipo de fotómetro utilizado en gran medida en laboratorios de centros de investigación:



Figura 3.3.3. Ejemplo de la parte frontal (izquierda) y parte trasera (derecha) de un fotómetro muy empleado en entornos industriales y laboratorios de centros de investigación y desarrollo. Este tipo de equipos cuenta con una gran precisión en la medida y permite medir un gran rango de valores. Disponen de una gran cantidad de accesorios que permiten medir iluminación, irradiancia así como otros tipos de magnitudes. Pueden ser conectados a ordenadores para transferir la información medida y su calibración debe realizarse periódicamente para garantizar su correcto funcionamiento. [IL 1700]

Fotómetros portátiles

De manera opuesta a los equipos industriales, nos encontramos con una gama amplísima de equipos de precio mucho más reducido, con menores prestaciones en lo que a precisión, sensibilidad y magnitudes a medir se refieren. La mayoría de ellos son concebidos para medir la iluminación, de ahí que se les denominen luxómetros en lugar de fotómetros. Al igual que los equipos industriales, la cabeza fotométrica de estos dispositivos son elementos integradores que, en este caso, miden de forma directa la iluminación recibida en las cabezas fotométricas.

Una gran desventaja que presentan los equipos portátiles es la necesidad de cambiar el intervalo de rango de medida dependiendo de la iluminación del entorno. Por otro lado, los luxómetros portátiles presentan la gran ventaja de que pueden ser utilizados en medidas de instalaciones de alumbrado público de forma cómoda. Muchos de este tipo de luxómetros presentan conexiones a ordenadores donde los datos pueden analizarse y procesarse adecuadamente.

La conectividad digital los convierte en dispositivos que pueden ser utilizados también en medidas dinámicas aunque la fatiga en estos dispositivos es elevada, de manera que la velocidad con la que se puedan realizar las medidas dinámicas sería más baja de lo deseado.



Figura 3.3.4. Luxómetro portátil. Los luxómetros portátiles presentan muy diversas calidades en lo que a su capacidad de medir se refiere. Se pueden llegar a encontrar dispositivos de este tipo con una relación de precio de hasta 5:1 en equipos portátiles. Algunos de ellos son muy notables para poder trabajar con ellos en las condiciones más exigentes. Los luxómetros portátiles de gama alta tienen salida de datos digital y tienen una respuesta más rápida que los de gama baja. [Gossen 2012 b]

Fotómetros de luz reflejada

Otro tipo de fotómetros portátiles son aquellos que hacen uso de la luz reflejada en un entorno o escena para obtener la medida, generalmente de la luminancia.



Figura 3.3.5. Fotómetro de luz reflejada. El sistema óptico trabaja abarcando generalmente un área angular de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y concentra la luz que incide desde este área vista por el sistema óptico en un sensor que transforma la luz en una señal eléctrica al igual que ocurre con los otros tipos de fotómetros. Son dispositivos muy útiles para medir la luminancia de zonas o entornos con iluminación compleja y derivar a partir de este tipo de medidas, la iluminación existente en dichas regiones. [Pigmentomedia 2011]

Este tipo de fotómetros viene acompañados de un sistema óptico cuyo campo de visión está en relación con el tamaño del sensor fotométrico, normalmente una célula fotovoltaica. Muchos dispositivos de este tipo presentan un visor para conseguir encuadrar la porción de espacio de interés del entorno sobre la cual se desea realizar la medida.

Fotodiodos

Los fotodiodos son elementos integradores de la radiación electromagnética y que por tanto, presentan el mismo comportamiento que los dispositivos comentados anteriormente, es decir, convierten en una señal eléctrica la cantidad de energía lumínica que incide sobre ellos.

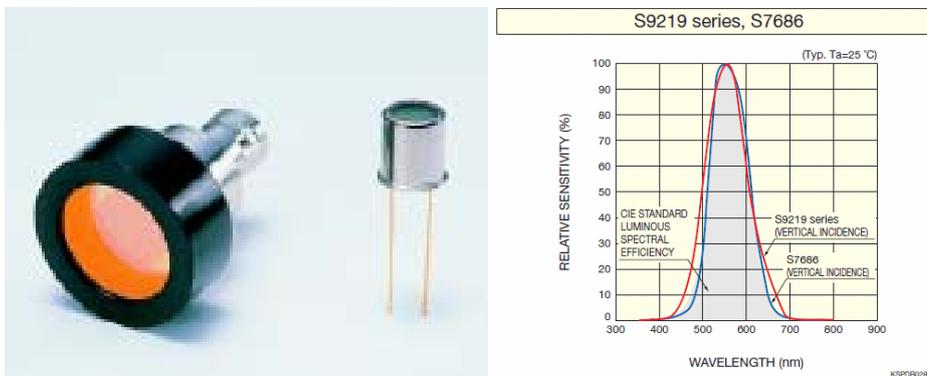


Figura 3.3.6. Ejemplo de fotodiodo acoplado a un filtro fotométrico (modelo S9219) (izquierdo) y su curva de respuesta espectral para tres tipos de estos fotómetros (derecha) desarrollados por Hamamatsu. La principal novedad de estos equipos es su elevada capacidad de ser implementados en

cualquier tipo de equipo fotométrico, así como su rango dinámico y rapidez para realizar medidas de forma dinámica. [Hamamatsu 2012]

En los últimos años, principales fabricantes de material electrónico a nivel mundial, por ejemplo Hamamatsu, han comenzado a diseñar este tipo de sensores. En concreto, se han desarrollado modelos basados en fotodiodos que unidos a un filtro fotométrico, que generalmente se corresponde con la respuesta espectral del sistema visual humano a nivel fotópico, han conseguido obtener un dispositivo en miniatura que emula a todos los efectos a un luxómetro convencional.

El rango dinámico de este tipo de dispositivos es muy elevado, incluso mayor que en los equipos portátiles. Su respuesta espectral presenta una gran similitud a la del sistema visual humano, motivo por el cual se postulan como dispositivos muy adecuados para la medida de la iluminación. Presentan una robustez considerable a cambios de temperatura y a la fatiga electrónica. Finalmente, el precio es muy competitivo comparado con otras soluciones comerciales.

Este tipo de luxómetros en miniatura son muy adecuados para el ensamblaje de equipos que combinan distintos tipos de tecnologías para realizar medidas de diferentes magnitudes en un único sistema de medida. También son apropiados para las medidas dinámicas puesto que su frecuencia de trabajo es elevada. En la siguiente figura se muestra una imagen de uno de estos dispositivos desarrollados por Hamamatsu junto a su respuesta espectral.

Videofotómetros

Los videofotómetros son los dispositivos que más evolución han experimentado en los últimos años. Su capacidad de medir distintas magnitudes fotométricas y radiométricas, sus reducidas dimensiones así como sus precios asequibles hacen de este tipo de dispositivos los productos estrella dentro del mercado de la instrumentación fotométrica.

Una de las grandes ventajas que presentan los videofotómetros con respecto a todos los demás dispositivos es la capacidad de discernir la dirección espacial de la incidencia de la luz sobre dichos dispositivos. Los videofotómetros emplean tecnología CCD o CMOS que trabaja conjuntamente con sistemas ópticos; la matriz que presentan los píxeles de los

sensores digitales actúa de manera que es posible muestrear con gran precisión las direcciones espaciales de las que proviene la luz de una escena cuando esta incide sobre el videofotómetro. Además, el uso de filtros sobre los sensores digitales también abre las puertas al análisis colorimétrico de los entornos de medida.

Los videofotómetros presenta además grandes rangos dinámicos de trabajo y profundidades de bit elevadas, permitiendo que cada píxel funcione como un fotómetro individual. Los videofotómetros miden luminancia, y también son aptos para su uso en medidas dinámicas ya que la frecuencia de trabajo es lo suficientemente elevada como para efectuar medidas fotométricas. No obstante, en la gran mayoría de los casos son empleados en medidas estáticas y su uso principal es el análisis de la luminancia o el efecto de deslumbramiento en entornos de iluminación complejos. Compañías como Canon o Toptical han desarrollado este tipo de dispositivos a nivel comercial.



Figura 3.3.7. Ejemplo de videofotómetro (izquierda) desarrollado por la empresa Toptical y gráfico de luminancias en un túnel (derecha) obtenido con este tipo de dispositivos. Los videofotómetros aprovechan las grandes ventajas que proporcionan hoy día los sensores digitales para realizar medidas fotométricas con una gran versatilidad. Su mayor uso son las medidas de la luminancia y el deslumbramiento en entornos con instalaciones de iluminación complejas. [Toptical 2012]

Dispositivos combinados

Finalmente, se exponen los dispositivos combinados empleados actualmente. Los equipos combinados hacen uso de diferentes técnicas, metodologías y dispositivos para realizar distintas medidas de diversas magnitudes en un solo sistema físico.

Existen casos como el equipo fotométrico llamado Memphis, desarrollado en Nueva Zelanda (figura 3.3.8). Este equipo combina 4 fuentes de luz calibradas, junto con nueve luminacímetros y cinco sensores de iluminación que combinados entre sí, permiten realizar las medidas de luminancia, iluminancia y reflectancia de superficies de pavimentos de carreteras

en tan solo 12 segundos. El equipo está controlado desde un ordenador portátil donde se almacena todas las medidas y dispone de unas ruedas para ser trasladado a los puntos de medida, que se realizan de manera estática.



Figura 3.3.8. Muestra de un equipo fotométrico combinado; en la imagen de la izquierda se puede ver el chasis del equipo con su salida de datos hacia un ordenador portátil. En la imagen de la derecha, se muestra al equipo sin el chasis protector donde se pueden advertir los distintos sensores con los que trabaja este equipo. [Jackett 2009]

Otro dispositivo que combina distintos tipos de sensores para realizar las medidas fotométricas en instalaciones de alumbrado público es el que aparece en la figura 3.3.9. Denominado como Coluroute, éste es un dispositivo móvil que cuenta con una treintena de luminancímetros que trabajan en paralelo con un reflectómetro.

El sistema es autónomo y su movimiento es programable; el primer prototipo de coluroute fue desarrollado en 2008 principalmente en Francia y con el apoyo de Philips Company.

Aunque su velocidad de desplazamiento no es elevada, es un primer prototipo de sistema de medida fotométrica que plantea la realización de medidas de forma dinámica sin depender de vehículos adicionales. Los equipos de medida que se plantean en medidas dinámicas, llevan asociados sistemas de posicionamiento basados en GPS. De esta forma se pueden correlacionar las medidas fotométricas con la posición en la que se han realizado de forma automática.



Figura 3.3.9. Ejemplo de un prototipo de dispositivos de medida fotométrico dinámico. El sistema evalúa la luminancia de las instalaciones de alumbrado público, como las carreteras así como el estado del pavimento mediante medidas de reflectometría de la luz sobre la superficie del asfalto. Este tipo de equipos es capaz de realizar hasta un centenar de medidas en pocos segundos. [Jackett 2009]

Todo el instrumental aquí presentado ayuda a realizar, de manera cada vez más eficiente y precisa, las complejas medidas fotométricas de entornos de iluminación tan complejos como son carreteras, túneles u otro tipo de infraestructuras públicas de esta naturaleza.

A continuación se muestran una serie de estudios que han sido hallados y mencionados en la literatura acerca de los últimos avances en el campo de las medidas fotométricas de grandes superficies y en especial, en la aplicación a la medida de instalaciones de alumbrado público.

3.3.3.- Trabajos y metodologías actuales empleadas en la medida de la iluminación de instalaciones de alumbrado público.

En el campo de la eficiencia energética, se están realizando continuamente distintos avances y planteando paulatinamente nuevos conceptos y estrategias de medidas fotométricas. El objetivo principal es obtener un mayor rendimiento con los menores costes técnicos, económicos y medioambientales posibles.

Se ha de destacar aquí el evento organizado por la CIE a nivel internacional denominado “International Symposium on Road Surface Photometric Characteristics”. En este Simposio se dan cita las propuestas más innovadoras dentro de las estrategias de medida fotométricas de vías públicas. Al revisar la literatura relacionada se advierte una gran variedad de trabajos de ingeniería aplicados a las medidas fotométricas de instalaciones de alumbrado público, desde estudios comparativos entre varios tipos de luminarias [Morante 2008] pasando por la revisión de los estándares para la implementación de las tecnologías de streelighting [Sethi 2006] hasta presentaciones y publicaciones en congresos y revistas de ingeniería de los últimos avances técnicos desarrollados. [Üncü 2010, Jackett 2009, Sánchez de Miguel 2010, Fujiyama 2005, Güller 2002].

De los tres aspectos comentados en el párrafo anterior, el que más importancia plantea en esta tesis doctoral es el referido a los nuevos equipos de medida y sus estrategias asociadas. Como se ha podido ver en el último apartado, existe una gran variedad de equipos fotométricos. Las nuevas técnicas de medida llevan asociado el concepto de medida dinámica, que no es otro que realizar las medidas en movimiento. Además de una medida dinámica, existe el gran interés de referenciar correctamente las medidas con el lugar exacto donde han sido realizadas así como la transmisión de datos en tiempo real haciendo uso de tecnologías WIFI o GSM.

Existen trabajos muy interesantes, como el realizado por el Transportation Institute (2007) [Gibbons 2007] donde se analiza la evolución de las técnicas de medida fotométricas y se plantea un método dinámico de la medida de luminancia del pavimento de una carretera. El equipo usado es un luminancímetro cuyo sensor es una cámara digital, de esta forma, el luminancímetro pasa a ser un videoluminancímetro dinámico, pues toda la serie de medida es realizada desde dentro de un vehículo (ver figura). El equipo se encuentra conectado a un ordenador donde se registra la información.



Figura 3.3.10. Parte trasera del coche (fotografía superior) donde se puede ver el equipo informático donde se alberga el ordenador con el disco duro. En la fotografía inferior se puede ver como es colocado el videofotómetro en la parte delantera del coche para realizar las medidas dinámicas de luminancia. Este tipo de montajes plantea una prueba de calibración adicional que está relacionada con la afectación del coche a la medida realizada por el equipo fotométrico, el análisis de las sombras y posibles reflejos provocados por la arquitectura del vehículo deben ser tenidos en cuenta. [Gibbons 2007]

Otro trabajo aplicado interesante es el planteado por los desarrolladores de la Universidad de Padua (2008) donde realizan un reflecto-goniofotómetro. La idea está basada en el desarrollo de un trabajo anterior publicado por la CIE en el año 2006. El equipo está basado en un luminancímetro compacto que puede realizar medidas de forma dinámica y a plena luz del día. Aunque en el trabajo de los desarrolladores italianos no se comenta su uso en movimiento, lo plantean como una posibilidad de cara al futuro para posibles inspecciones automáticas y mucho más rápidas de las infraestructuras como las carreteras cuya relación con los sistemas de iluminación es máxima.

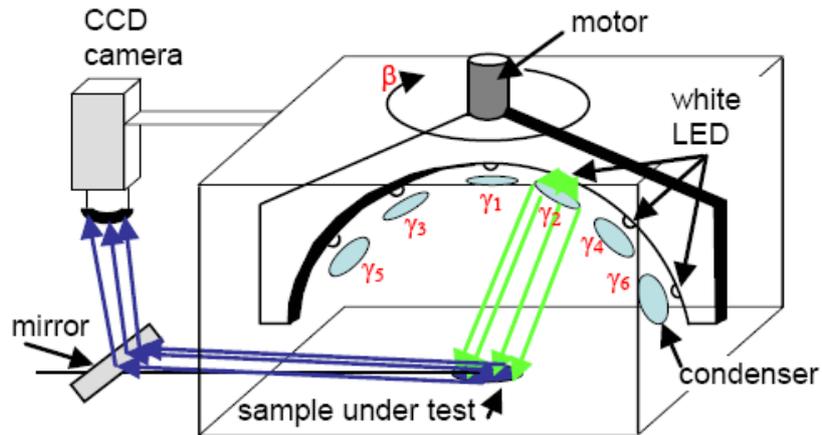


Figura 3.3.11. Esquema del equipo desarrollado por la Universidad de Padua donde se puede ver como la fuente de luz hace incidir una cierta cantidad de flujo luminoso sobre un área de medida, la luz es reflejada en esta zona y analizada posteriormente por un sistema basado en una cámara CCD. La fuente de luz está motorizada para poder muestrear toda la semiesfera que rodea al área de medida. [Casol 2008]

Un trabajo más reciente y realizado en España, es el presentado por la Universidad Complutense de Madrid (2010), concretamente por el departamento de Astrofísica. En este trabajo se analiza la contaminación lumínica del cielo de la comunidad madrileña mediante la realización de medidas fotométricas dinámicas.

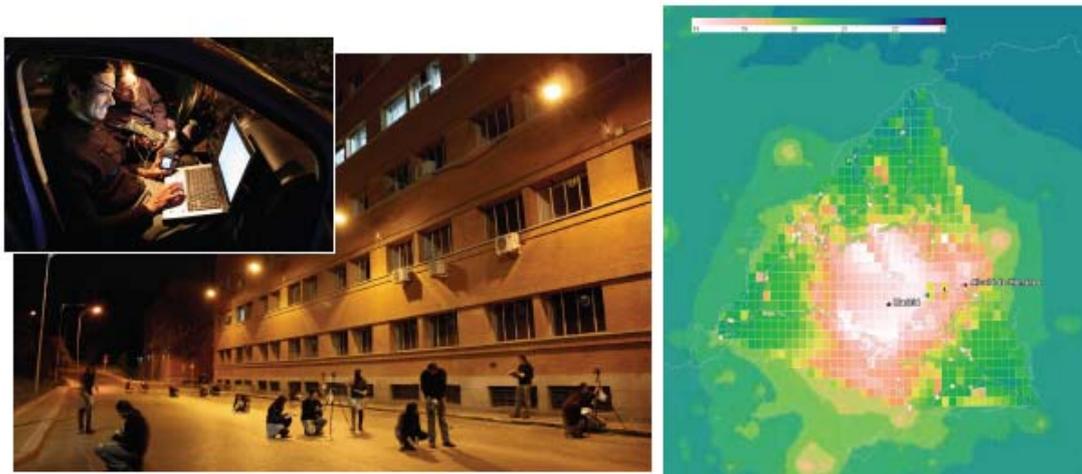


Figura 3.3.12. Fotografías de trabajo durante la toma de datos por el equipo de investigación del departamento de astrofísica de la Universidad Complutense de Madrid (izquierda) y mapa de la situación lumínica de la comunidad madrileña (derecha). En este caso también se ha empleado un coche para realizar medidas dinámicas de la iluminación. [Sánchez de Miguel 2010]

El grupo de investigación ha desarrollado un método para medir la iluminación de las vías públicas de la capital madrileña. Mediante la colocación de un luxómetro en la parte superior de un vehículo e información proporcionada por los satélites DMPS se han obtenido datos acerca de la iluminación de Madrid pudiendo evaluar qué zonas cumplen y cuáles no con la normativa contemplada en el real decreto revisado en los primeros apartados de este capítulo.

3.4.- Luminarias y lámparas para alumbrado público.

El sistema de medida fotométrica presentado en esta tesis doctoral se enmarca dentro del ámbito de las medidas fotométricas de instalaciones de alumbrado público, por tanto, este punto dedicará especial atención a los sistemas de iluminación cuyas aplicaciones sean, entre otras, las de alumbrado público.

3.4.1- Elementos de las luminarias.

Se define luminaria como aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas, (excluyendo las propias lámparas) así como los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación. [Anfalum 2005]

De manera general consta de los siguientes elementos

1. **Armadura o carcasa:** Es el elemento físico mínimo que sirve de soporte y delimita el volumen de la luminaria conteniendo todos sus elementos.



Figura 3.4.1. Distintos ejemplos de carcassas de luminarias de alumbrado público. Su función es proteger todo el sistema de los agentes externos así como de impedir al máximo la contaminación lumínica de las instalaciones. [light pole 2012]

2. Equipo eléctrico: Sería el adecuado a los distintos tipos de fuentes de luz artificial y en función de la siguiente clasificación:

- Incandescentes normales sin elementos auxiliares.
- Halógenas de alto voltaje a la tensión normal de la red, o de bajo voltaje con transformador o fuente electrónica.
- Fluorescentes. Con reactancias o balastos, condensadores e ignitores, o conjuntos electrónicos de encendido y control.
- De descarga. Con reactancias o balastos, condensadores e ignitores, o conjuntos electrónicos de encendido y control.
- LED. Lámparas de estado sólido, sin filamento ni gas inerte que lo rodee, ni cápsula de vidrio que lo recubra. El LED es un semiconductor unido a dos terminales cátodo y ánodo recubierto por una resina epoxy transparente.



Figura 3.4.2. Lámpara de alumbrado público basada en tecnología LED. Las lámparas de este tipo llegan a tener entre 60 y 90 LEDs normalmente y pueden consumir unos 80W de potencia con una eficiencia base de 100lm/W. [b2b-linx 2012]

3. Reflectores: Son determinadas superficies en el interior de la luminaria que modelan la forma y dirección del flujo de la lámpara. En función de cómo se emita la radiación luminosa pueden ser:

- Simétrico (con uno o dos ejes) o asimétrico.

- Concentrador (haz estrecho menor de 20°) o difusor (haz ancho entre 20 y 40° ; haz muy ancho mayor de 40°).
- Especular (con escasa dispersión luminosa) o no especular (con dispersión de flujo).
- Frío (con reflector dicróico) o normal.

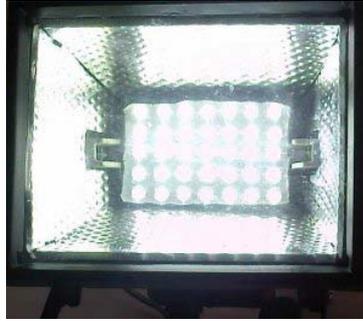


Figura 3.4.3. Ejemplo de reflector basado en tecnología LED. Este tipo de sistemas alcanzan una eficiencia ligeramente mayor que las lámparas convencionales. Presentan una buena reproducción colorimétrica, lo que otorga también una correcta ergonomía visual. [Multilamp 2009]

4. Difusores: Elemento de cierre o recubrimiento de la luminaria en la dirección de la radiación luminosa. Los tipos más usuales son:

- Opal liso (blanca) o prismática (metacrilato traslúcido).
- Lamas o reticular (con influencia directa sobre el ángulo de apantallamiento).
- Especular o no especular (con propiedades similares a los reflectores).



Figura 3.4.4. Difusor prismático de luminaria convencional. Este tipo de difusores facetados, envían la luz de manera uniforme sobre el área de interés. La iluminación que provocan es muy homogénea aunque contribuyen a un menor rendimiento de la luminaria. [Silvania 2012]

5. Filtros: En posible combinación con los difusores sirven para potenciar o mitigar determinadas características de la radiación luminosa.

3.4.2- Lámparas empleadas en iluminación pública.

Las lámparas utilizadas en el alumbrado público deben presentar algunas características que permitan un ahorro energético y, por tanto, económico. En la siguiente tabla, a modo de resumen, se exponen diferentes características de los tipos de lámparas más empleadas en iluminación.

A la vista de la tabla 3.4.1, la mayor parte de las lámparas utilizadas en el alumbrado público utilizan un sistema de descarga eléctrica en un gas, generalmente lámparas de mercurio con rendimientos inferiores a otras opciones que se encuentran en el mercado. Los sistemas de descarga consisten en dos electrodos que generan un flujo de electrones por medio de un gas; la excitación de los átomos del gas permite generar luz, cuyas características están en función de la lámpara utilizada. Los tipos más utilizados en el alumbrado público son:

- Lámparas fluorescentes (a)
- Lámparas de vapor de mercurio de alta presión (b)
- Lámparas de vapor de sodio a baja presión (c)
- Lámparas de vapor de sodio a alta presión (d)
- Lámparas de mercurio con halógenos metálicos (e)
- Lámparas de tecnología LED (f)

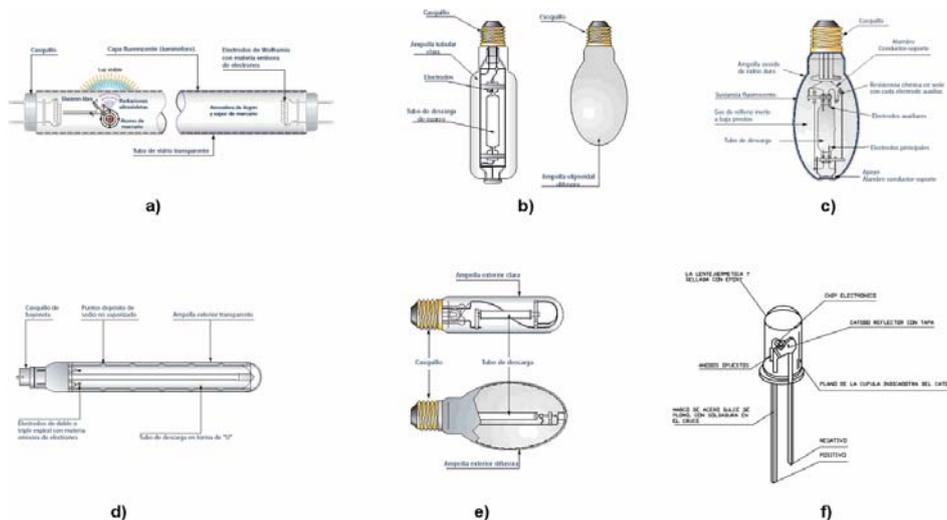


Figura 3.4.5. Esquemas de los tipos de lámparas más usados en alumbrado público.[Luminotecnia 2012]

Tipo de lámpara	Costo relativo lámpara	Eficiencia luminosa	Aspecto cromático	Reproducción del color	Aplicaciones
Incandescentes	Bajo	Muy baja	Cálido	Muy buena	Uso muy general
Halógenas	Medio-bajo	Baja	Cálido	Muy buena	Decoración interior
Fluorescentes	Medio-elevado	Alta	Cálido Intermedio Frío	Buena	Alumbrado público e industrial <i>Industria y alumbrado público</i>
Vapor mercurio	Medio	Media	Frío	Media	Alumbrado público
Halogenuros metálicos	Elevado	Alta	Frío	Buena	Alumbrado instalaciones deportivas
Vapor sodio alta presión	Elevado	Alta	Cálido	Media	<i>Industria y alumbrado público</i>
Vapor sodio baja presión	Elevado	Muy alta	Cálido	Muy mala	Alumbrado público y de seguridad <i>Alumbrado de señalización,</i>
LED	Medio	Muy alta	Cálido Intermedio Frío	Muy buena	alumbrado público.

Tabla. 3.4.1

De la tabla anterior, se han de destacar las grandes prestaciones que la tecnología LED aporta al campo de la iluminación de alumbrado público. Su coste comienza a ser competitivo con las actuales soluciones de iluminación para alumbrado público y sus características eléctricas y fotométricas se están proyectando como la nueva alternativa tecnológica de cara a los próximos años. La tecnología LED abre también un campo muy extenso del diseño óptico de sistemas de iluminación para adecuar de manera cada vez más eficiente la emisión luminosa de los diodos. [Fernández-Dorado 2010, Arasa 2011b]

Capítulo 4

Estrategia de medida

A lo largo del capítulo 3, se ha expuesto cómo la medida de la iluminación del alumbrado público atiende a unas normas que establecen, de manera clara, el objetivo, procedimiento y presentación de los datos fotométricos [UNE-EN 13201-2]. En el presente capítulo se justifica la estrategia de medida propuesta, de manera que cumpla con los requisitos exigidos por la legislación vigente.

La estrategia de medida propuesta realiza la medida de la cantidad y distribución geométrica de luz sobre superficies extensas, alejadas y en un entorno variable. Este capítulo se centra en la descripción del fundamento de la medida, los conceptos teóricos empleados así como la validez de la estrategia de la medida propuesta.

El capítulo se encuentra organizado en cinco secciones. En la primera de ellas se explica el contexto teórico, haciendo referencia al planteamiento físico de la medida, analizando los conceptos y elementos fundamentales de los que se irán haciendo referencia en todo el capítulo. En las secciones segunda y tercera se describe, por un lado, el concepto de la discretización y el conocimiento de la distribución angular fotométrica de la iluminación, y por otro, los rangos válidos de utilidad de la medida. La cuarta sección establece la función cooperativa de la medida y finalmente, en la quinta sección de este capítulo se explica cómo es presentada la información.

4.1 Principio de medida

El dispositivo a desarrollar ha de realizar la medida de la cantidad y distribución geométrica de iluminación policromática en superficies extensas. El dispositivo debe desplazarse a lo largo de un plano de referencia adecuado donde en unos puntos determinados de dicho plano pueda establecerse la medida de la cantidad y distribución de la luz emitida por un conjunto de fuentes luminosas en un determinado entorno. Mediante un proceso de muestreo y propagación de la medida, la información obtenida en el plano de referencia puede ser evaluada en cualquier otra superficie de interés.

Esta sección queda dividida en tres puntos fundamentales. En el primero de ellos se establece el contexto teórico donde se definen conceptos como el lugar geométrico y el entorno de la medida exponiendo los elementos necesarios para la ejecución de ésta. En el segundo punto, se relaciona la estrategia de medida propuesta con la ley fotométrica del cuadrado de la distancia. Finalmente, en el tercer punto se explica el método de muestreo y propagación utilizado.

4.1.1. Contexto teórico

El dispositivo propuesto ha de caracterizar la cantidad y distribución de la iluminación en un entorno de medida determinado proporcionada por un conjunto de fuentes luminosas suficientemente alejadas. Se entiende por entorno de medida una configuración de sistema/s de alumbrado público/s y particular/es situado/s en la vía pública. El entorno de medida contempla tanto las fuentes luminosas primarias como las lámparas y luminarias destinadas a la propia iluminación de la vía así como también las fuentes luminosas secundarias tales como escaparates, señales de tráfico, reflejos en paredes, luz parásita, etc (figura 4.1.1).

Todo entorno de medida lleva asociado un plano de registro o plano de nodos. El plano de registro es una superficie paralela al plano de la vía iluminada y está formado por una serie de puntos de medida (x_r, y_r) . El primero de los puntos de medida establece el origen de coordenadas global de todo el entorno. El conjunto de todos los puntos de medida define una retícula cuya geometría se ajusta en cada caso al entorno. En cada uno de dichos puntos (x_r, y_r) se asigna un nodo de medida del plano de nodos, que en conjunto funcionarán de

forma cooperativa para aportar la información necesaria a la realización de los mapas de iluminación.

En cada punto de medida del plano de nodos se tiene una pareja de parámetros fotométricos a determinar, es decir, la cantidad total de iluminación y la distribución geométrica de la misma. La información captada en el plano de registro puede ser propagada a cualquier otro plano de interés, denominado plano de la medida, situado a una distancia d determinada según los requisitos de las mediciones (ver figura 4.1.1). Será en este plano donde se obtengan los resultados finales.

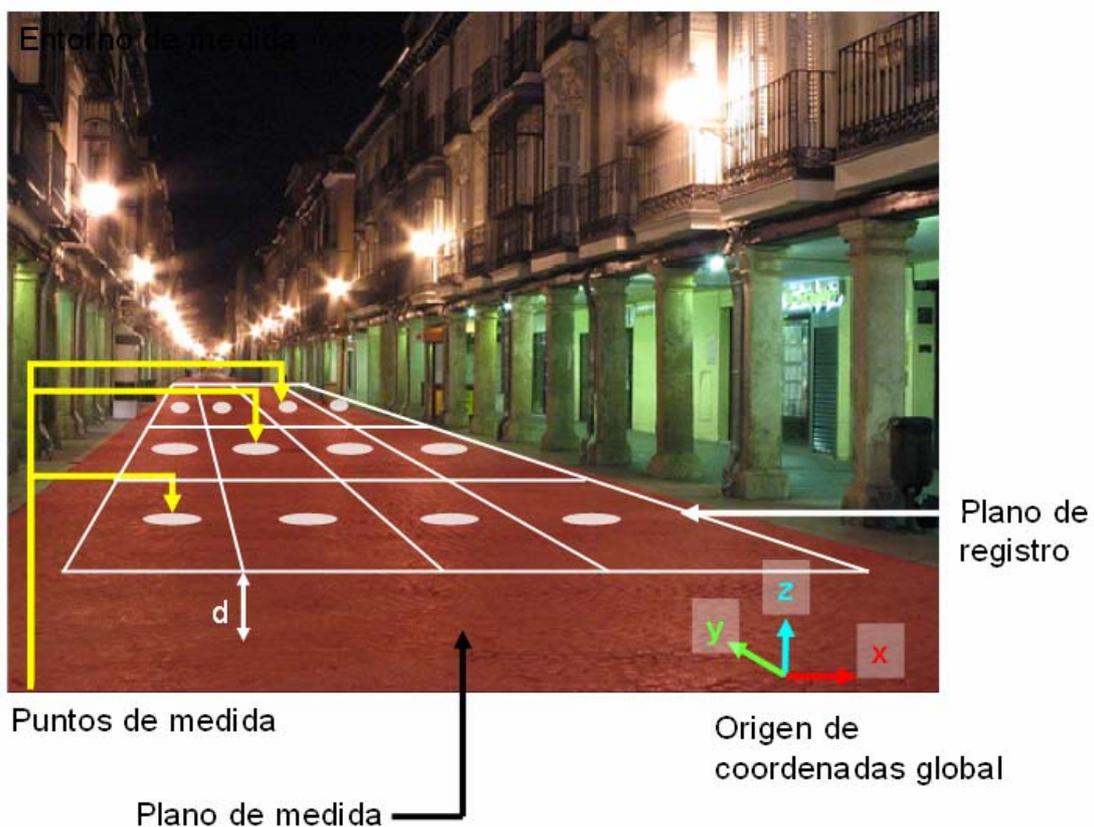


Fig. 4.1.1. Esquema general explicativo del entorno de medida. En esta imagen se destacan los elementos que hacen posible y de manera correcta la ejecución de la medida fotométrica. [Polux 2011]

La cantidad total de iluminación recibida en cada uno de los puntos de medida se realiza a través de un fotómetro que determina la densidad de flujo luminoso por unidad de superficie, es decir, la iluminación medida en lux y por tanto, el fotómetro actuará propiamente como un luxómetro.

Los luxómetros son elementos integradores de la radiación electromagnética que incide sobre ellos en toda una semiesfera. Su curva de respuesta espectral es semejante a la del sistema visual humano y por lo tanto permiten realizar medidas fotométricas válidas.

La distribución geométrica de la iluminación en cada punto de medida se determina a través de un sistema óptico, en este caso, un objetivo tipo gran angular que trabaja conjuntamente con una cámara digital (figura 4.1.2).

El objetivo trabaja a máxima apertura enfocado a infinito, su campo de visión es de 180° , y por tanto, para cada punto de medida, se puede captar información de todos los rayos incidentes referidos a una semiesfera cuyo origen de coordenadas local se sitúa justo en el centro de la pupila de entrada del objetivo (figura 4.1.3). Esta semiesfera es por tanto el lugar geométrico de cada uno de los puntos de medida fotométricos.

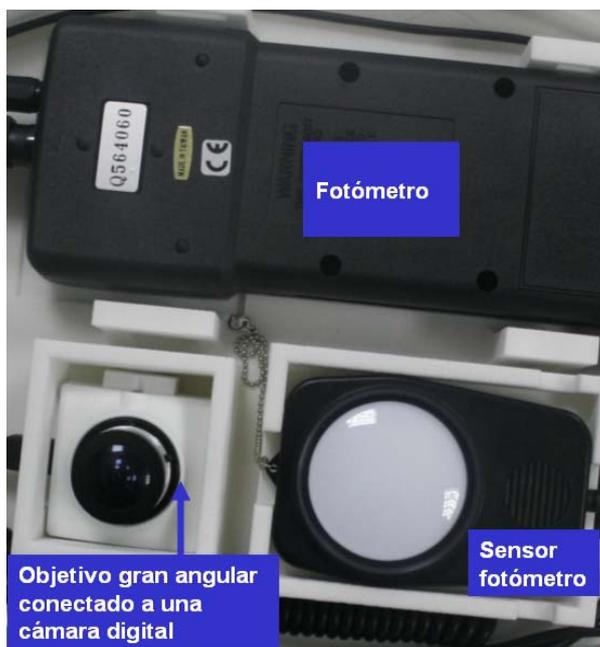


Fig. 4.1.2. Elementos principales del dispositivo que permiten obtener tanto la cantidad total de iluminación mediante el fotómetro como la distribución geométrica por medio de la cámara digital que trabaja conjuntamente con un objetivo gran angular. Los elementos trabajan de manera síncrona y obtienen la información en cada punto de medida del plano de registro.

Tanto la medida de la cantidad total de iluminación como la distribución en cada punto de medida se efectúan de manera síncrona. Así, para cada punto de medida (x_r, y_r) se tienen la cantidad total de iluminación y su distribución geométrica.

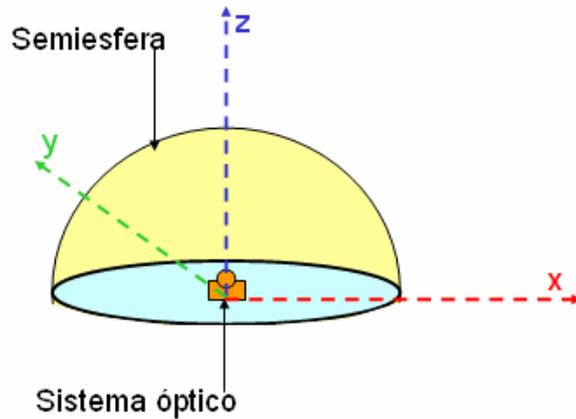


Fig. 4.1.3. Lugar geométrico para cada punto de medida. Desde cada punto de la medida, se tienen una pareja de parámetros fotométricos, el valor total de la iluminación y la distribución geométrica registrada en toda una semiesfera centrada en cada uno de los puntos de medida (x_m, y_m) .

Cuando un conjunto de haces de rayos, con una misma dirección, inciden en la pupila de entrada, todos y cada uno de ellos alcanzan el mismo píxel (i, j) del elemento sensor y en función de la cantidad de energía de la que sean portadores se alcanzará un cierto nivel de corriente, que una vez digitalizado denominaremos, de ahora en adelante, nivel de gris para el píxel con coordenadas (i, j) correspondiente a la dirección de incidencia de la luz (figura 4.1.4).

Ya hemos mencionado que en cada punto de medida nuestro procedimiento asocia una esfera centrada en la pupila de entrada del objetivo (figura 4.1.3). La dirección de cada haz de luz incidente sobre la pupila de entrada del sistema óptico, viene determinada por dos ángulos, el acimut y la elevación (figura 4.1.5). Los ángulos de acimut y elevación son los ángulos formados por las proyecciones del vector director del rayo incidente con los ejes de coordenadas. Así, el acimut es el ángulo formado por la proyección del vector director del rayo incidente con el eje x mientras que la elevación es el ángulo formado entre el vector director del rayo incidente y el eje z. [Wolfe 1998]

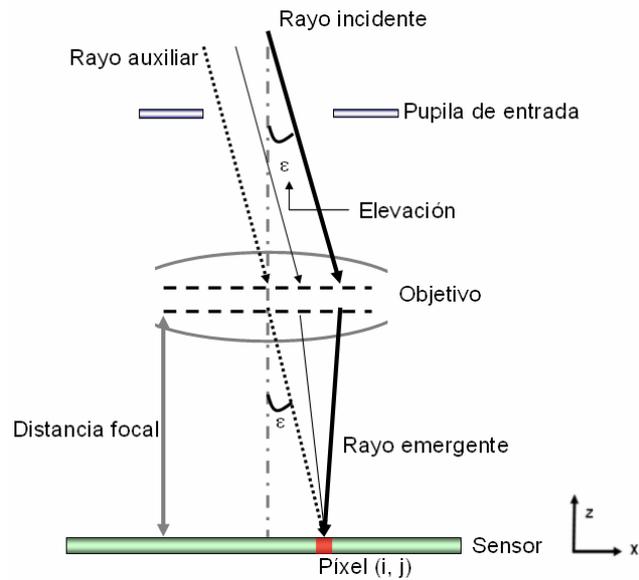


Fig. 4.1.4. Esquema de la medida de la dirección de un rayo el plano xz. Los rayos que incidan con el mismo ángulo de elevación ε serán registrados en la misma posición (i, j) del sensor.

Estos ángulos, a priori desconocidos, se pueden hallar en función de la posición (i, j) de cada píxel conociendo la distorsión introducida por el objetivo gran angular.

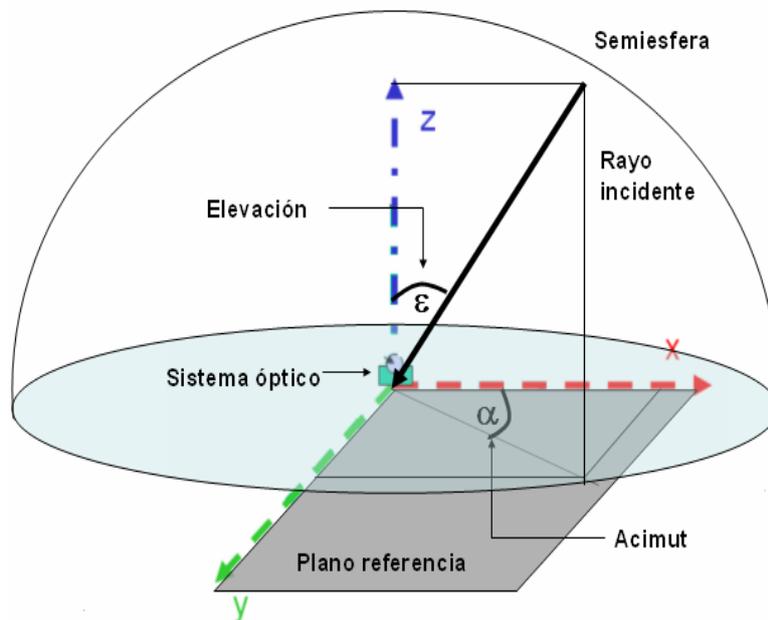


Fig. 4.1.5 Definición de los ángulos acimut y elevación en la semiesfera de medida. Por comodidad, se ha elegido en esta representación la perspectiva caballera invirtiendo el sentido del eje y con respecto a las figuras anteriores. El ángulo de elevación varía entre 0 y 90 grados mientras que el acimut variará entre 0 y 360 grados. El ángulo de elevación valdrá 0° cuando la luz incida con la misma dirección del eje z mientras que el ángulo de acimut será nulo cuando la proyección del rayo incidente sobre el plano de referencia coincida con el eje positivo de la coordenada x.

La aberración de distorsión se puede expresar como una función con simetría de revolución en torno al eje z (eje óptico) del sistema siempre y cuando éste también sea un sistema óptico de revolución en torno al eje óptico del mismo. Mediante un cambio de coordenadas, la aberración puede ser determinada en coordenadas cartesianas y así conocer su valor para cada píxel (i, j) permitiendo obtener la pareja de valores acimut y elevación. Por tanto, a cada pareja de ángulos de incidencia acimut y elevación (α, ε) le corresponde una pareja de valores de posición (i, j) relacionados mediante una función f asociada a las propiedades del objetivo gran angular utilizado en cada caso.

$$(\alpha, \varepsilon) = f(i, j) \quad \text{Ecuación. 4.1.1}$$

Por otro lado, a partir de cada valor de gris asociado al píxel (i, j) , debe poder obtenerse la correspondencia entre dicho valor de gris y la cantidad de flujo luminoso por unidad de área que llega al píxel, esto es la iluminación, que se define como el cociente entre el flujo luminoso por unidad de superficie (ecuación 4.1.2). [Palmer 2009, Wolfe 1998]

La relación entre iluminación y nivel de gris no es invariante bajo cambio de píxel ya que está sujeta a la falta de constancia de transmitancia del objetivo en función del ángulo de elevación.

$$E_{\text{píxel}}(i, j) = \frac{d\varphi_{\text{píxel}}(i, j)}{dS_{\text{píxel}}} \quad \text{Ecuación. 4.1.2}$$

Donde el numerador $d\varphi_{\text{píxel}}$ representa el flujo luminoso incidente sobre un píxel de coordenadas (i, j) y el denominador $dS_{\text{píxel}}$ representa el valor del área de dicho píxel. [Palmer 2009, Arranz 2005]

La iluminación de una imagen formada por un sistema óptico depende de la apertura del mismo (figura 4.1.6).

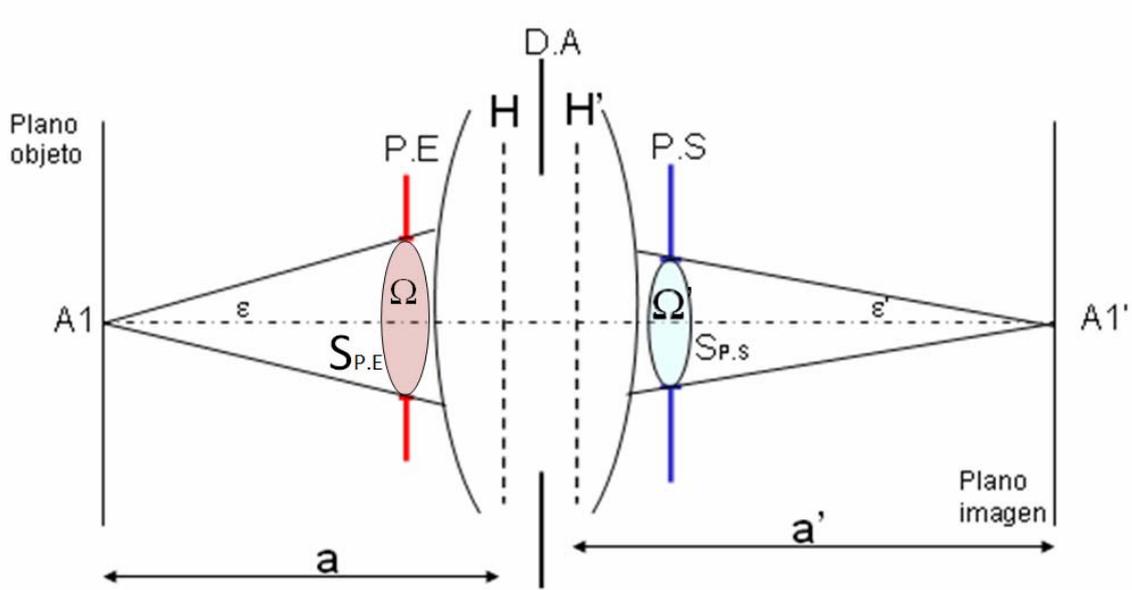


Fig. 4.1.6 Esquema de formación de la imagen A1' de un punto A1 a través de un sistema óptico. El ángulo sólido visto desde punto A1 depende de la distancia imagen a, del ángulo de elevación y de la superficie de la pupila de entrada. Cuanto mayor sea la superficie de la pupila de entrada, mayor es el ángulo sólido. El ángulo sólido también aumentará si se reduce la distancia imagen o si el ángulo de elevación se hace nulo, es decir, la luz incide con la dirección del eje óptico del sistema.

Para un objeto emisor de luz situado en el eje óptico del sistema a una distancia objeto a, el ángulo sólido $d\Omega$ subtendido desde el punto objeto A1 a la pupila de entrada será:

$$\Omega = \frac{S_{P.E.}}{a^2} \cos(\varepsilon) \quad \text{Ecuación. 4.1.3}$$

De manera totalmente análoga, el ángulo sólido visto desde el punto imagen A1' con respecto a la pupila de salida:

$$\Omega' = \frac{S_{P.S.}}{a'^2} \cos(\varepsilon') \quad \text{Ecuación. 4.1.4}$$

Donde el numerador es la superficie de la pupila de entrada o salida pesado por un factor coseno cuyo argumento ε o ε' es el ángulo de elevación en el espacio objeto o imagen y el denominador es la distancia entre el punto objeto y la pupila de entrada o entre el punto imagen y la pupila de salida.

En realidad, el argumento del coseno que aparece en la expresión 4.1.3, también es una función del ángulo de elevación ε' en el espacio objeto y viceversa ya que parten de planos conjugados. De forma que en realidad, se puede escribir que:

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= \varepsilon'(\varepsilon) \\ \varepsilon &= \varepsilon(\varepsilon')\end{aligned}\tag{Ecuación. 4.1.5}$$

La relación entre ambos ángulos viene determinada por la geometría y disposición en el espacio de las pupilas de entrada y salida del sistema. Las geometrías de las pupilas de entrada y salida en sistemas ópticos tipo gran angular se alejan notablemente de las predicciones de la óptica paraxial. El ángulo de elevación en el espacio imagen está relacionado con el ángulo de elevación en el espacio objeto. Uno de los parámetros de diseño óptico es el ángulo de elevación (campo de visión). [Smith 2007, Fallah 1996, Casas 1994]

La función que relaciona a ambos ángulos de elevación depende de las características del sistema óptico. A priori, la función es desconocida a no ser que se disponga de todos los datos del sistema. Como los sistemas ópticos gran angular con los que se trabaja aquí son sistemas comerciales, no es posible acceder a dicha información. Se hace totalmente necesaria entonces la realización de pruebas experimentales que permitan obtener el comportamiento radiométrico en todo el campo de visión del sistema óptico gran angular. Estas pruebas serán contempladas en el siguiente capítulo.

El flujo luminoso que entra en el sistema óptico para una dirección (α, ε) a través de la pupila de entrada de un sistema óptico, se obtiene como [Wolfe 1998, Arranz 2005]:

$$d\phi(\alpha, \varepsilon) = L(\alpha, \varepsilon) \cdot dS \cdot d\Omega\tag{Ecuación. 4.1.6}$$

Dónde:

$L(\alpha, \varepsilon)$ es la luminancia del objeto emisor situado en A1.

dS es la superficie del objeto.

$d\Omega$ es el ángulo sólido subtendido por la pupila desde A1.

El flujo que emerge del sistema óptico a través de la pupila de salida es en general:

$$d\varphi'(\alpha', \varepsilon') = T(\alpha', \varepsilon') \cdot d\varphi(\alpha, \varepsilon) \quad \text{Ecuación. 4.1.7}$$

Si suponemos un sistema óptico perfecto, entonces el flujo luminoso que emerge del sistema es igual al flujo luminoso de entrada. En general, un factor de transmisión del flujo debido a los materiales debe ser tenido en cuenta, en este caso $T(\alpha, \varepsilon)$ hace referencia a dicho factor.

El flujo emergente del sistema óptico expresado en la ecuación 4.1.7 también puede ser escrito en función de los términos del espacio imagen como sigue:

$$d\varphi'(\alpha', \varepsilon') = T(\alpha', \varepsilon') \cdot L'(\alpha', \varepsilon') \cdot dS' \cdot d\Omega' \quad \text{Ecuación. 4.1.8}$$

Donde:

$L'(\alpha', \varepsilon')$ es la luminancia del objeto emisor situado en $A1'$.

dS' es la superficie de la imagen del objeto, en nuestro caso un píxel.

$d\Omega'$ es el ángulo sólido subtendido por la pupila de salida desde $A1'$.

Trabajando con las ecuaciones 4.1.3 y 4.1.6 y sustituyéndolas en la ecuación 4.1.2 se tiene la iluminación en el plano imagen del sistema óptico como:

$$E_{\text{píxel}}(i, j) = T(\alpha, \varepsilon) \frac{L(\alpha, \varepsilon) \cdot dS \cdot \frac{S_{P.E}}{a^2} \cos(\varepsilon)}{dS'} \quad \text{Ecuación. 4.1.9}$$

Teniendo en cuenta la definición de aumento lateral:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{x} = \frac{a'}{a} \rightarrow \beta^2 = \frac{y'x'}{yx} = \frac{dS'}{dS} = \left(\frac{a'}{a}\right)^2 \quad \text{Ecuación. 4.1.10}$$

Asumiendo que el objeto se encuentra lo suficientemente lejos del sistema óptico, se puede desarrollar en serie la distancia objeto a' haciendo tender a cero z' (distancia de la imagen al plano focal).

$$a' = f' + z' \rightarrow a'(z') = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a^n(0)}{n!} (z' - 0)^n \quad \text{Ecuación 4.1.11}$$

Desarrollando el sumatorio, se tiene finalmente:

$$a'(z') = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a''(0)}{n!} (z'-0)^n = (f'+z')_{z=0} + (z')_{z=0} + 0 + \dots$$

$$\downarrow$$

$$a' = f'$$

Ecuación 4.1.12

Se concluye entonces que, para posiciones objeto suficientemente alejadas, se puede asumir que la imagen se encontrará en el plano focal del sistema óptico. [Arranz 2005, Nicolau 2005]. Haciendo uso de 4.1.10 y 4.1.12 y simplificando en 4.1.9, se obtiene finalmente:

$$E_{pixel}(i, j) = T(\alpha, \varepsilon) L(\alpha, \varepsilon) \frac{S_{P.E}}{f'^2} \cos(\varepsilon)$$

Ecuación. 4.1.13

La iluminación de un píxel también puede expresarse en términos del espacio imagen del sistema óptico, empleando las ecuaciones 4.1.4, 4.1.8 y 4.1.12 y sustituyendo y simplificando en 4.1.2:

$$E_{pixel}(i, j) = T(\alpha', \varepsilon') \cdot L'(\alpha', \varepsilon') \cdot \frac{S_{P.S}}{f'^2} \cos(\varepsilon')$$

Ecuación. 4.1.14

Y teniendo en cuenta el aumento pupilar del sistema:

$$\beta_P = \frac{r_{ps}}{r_{pe}} \Rightarrow S_{ps} = \beta_P^2 S_{P.E}$$

Ecuación. 4.1.15

Normalmente, los valores del aumento pupilar son valores muy cercanos a la unidad para ángulos de elevación próximos a cero y valores de 0.5 cuando el ángulo de elevación es aproximadamente de 65°, llegando incluso a ser menor a 0.2 para ángulos de elevación cercanos o superiores a 90° de elevación. [LAIKIN 2001b]

Se puede escribir la iluminación recibida por un píxel:

$$E_{pixel}(i, j) = T(\alpha', \varepsilon') \cdot \beta_P^2 \cdot S_{PE} \cdot L'(\alpha', \varepsilon') \cdot \frac{\cos(\varepsilon')}{f'^2}$$

Ecuación. 4.1.16

Las expresiones 4.1.13 y 4.1.16 deben ser corregidas para el cálculo de la iluminación en puntos fuera de eje (figura 4.1.7). La distancia de los puntos objeto (A1-O, A2-O) o (A1'-O', A2'-O') difiere en un factor $\frac{1}{\cos(\varepsilon)}$ y $\frac{1}{\cos(\varepsilon')}$ respectivamente. Así, el segmento A1-O es $\cos(\varepsilon)$ veces más pequeño que el segmento A2-O. Este comportamiento es totalmente análogo en el espacio imagen donde el A1'-O' es también $\cos(\varepsilon')$ veces más pequeño que A2'-O' [Palmer 2009].

La iluminación disminuye según el inverso del cuadrado de la distancia. Si la iluminación se escribe en términos del espacio imagen, su valor se calculará entonces, para puntos fuera de eje, según la ecuación 4.1.17. [Wolfe 1998, Smith 2007]

$$E_{pixel}(i, j) = T(\alpha', \varepsilon') \cdot \beta_p^2 \cdot S_{PE} \cdot L'(\alpha', \varepsilon') \cdot \frac{\cos(\varepsilon')}{\left(\frac{f'}{\cos(\varepsilon')}\right)^2} = E|_{\varepsilon=0} \cos^3(\varepsilon') \quad \text{Ecuación. 4.1.17}$$

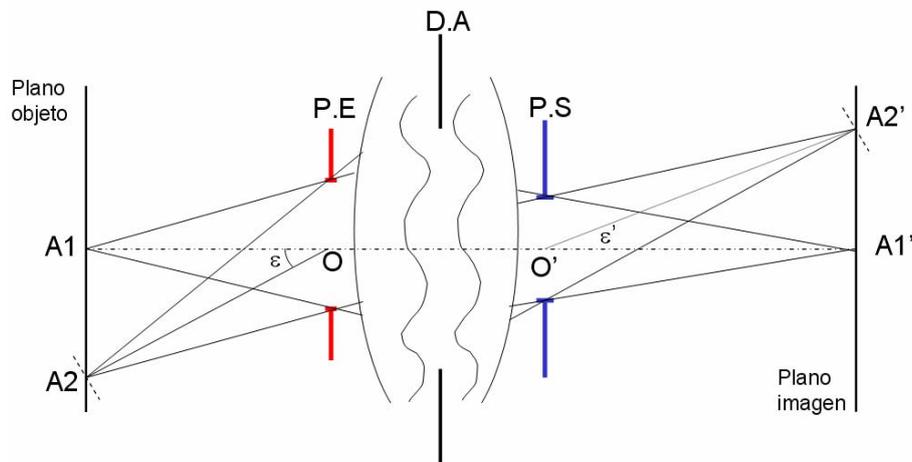


Fig. 4.1.7. Esquema de un sistema óptico donde se relacionan los elementos en el espacio objeto y sus elementos conjugados a través del sistema óptico en el espacio imagen. A partir de la geometría de los puntos objeto e imagen es posible discernir cuanto aumenta la distancia de los puntos objetos e imagen a las pupilas de entrada y salida respectivamente y en consecuencia, poder determinar como varía la iluminación en el plano imagen de un sistema óptico para puntos situados fuera de eje. [Smith 2007]

Finalmente, si generalizamos el razonamiento hecho hasta ahora para planos que no son normales al segmento A2-O (línea discontinua), un nuevo factor coseno debe ser

introducido en el cálculo de la iluminación en referencia a la propia inclinación que presenten dichos planos, quedando definitivamente.

$$E_{píxel}(i, j) = E|_{\varepsilon'=0} \cos^4(\varepsilon') \quad \text{Ecuación. 4.1.18}$$

La ecuación 4.1.18 es válida siempre que la pupila de salida del sistema no presente variación en tamaño o inclinación para puntos fuera de eje. Sin embargo, el sistema óptico que se empleará para la realización de las medidas fotométricas será un sistema gran angular y por tanto, las ecuaciones aquí obtenidas, deberán ser desarrolladas para este tipo de sistemas. [Palmer 2009]

Como se ha comentado anteriormente, para cada píxel se tiene un cierto nivel de gris. El nivel de gris equivale a una cierta cantidad de iluminación que debe ser corregida por los factores antes descritos y los propios cambios de dimensión y orientación que presenta la pupila de salida en los sistemas gran angular.

Dado que entre las coordenadas (i, j) y los ángulos acimut y elevación existe una función de correspondencia, la ecuación 4.1.17 puede escribirse en función de dichas coordenadas:

El conjunto de todos los píxeles iluminados en el plano focal, plano en el que se sitúa el sensor, describe el lugar geométrico del registro fotométrico que corresponde a la distribución geométrica de la iluminación recibida en cada punto de medida (x_r, y_r) . El lugar geométrico del registro es un círculo de diámetro igual a la dimensión menor del sensor (figura 4.1.8)

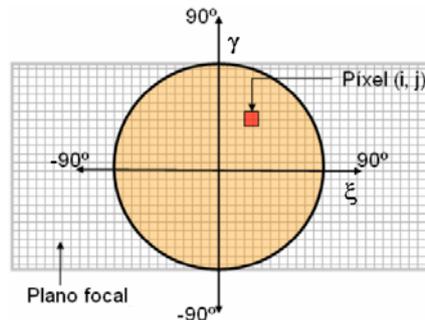


Fig. 4.1.8. Lugar geométrico del registro de la distribución de la iluminación. La zona que contiene la información fotométrica es la englobada en el círculo naranja de diámetro igual a la dimensión menor del sensor situado en el plano focal del objetivo.

La figura 4.1.8 puede interpretarse como un mapa angular de la distribución geométrica de la iluminación en un punto de medida. El mapa quedará delimitado en cuatro cuadrantes permitiendo identificar a partir de la posición de cualquier píxel del registro, la procedencia y el valor porcentual relativo de iluminación de cualquier tipo de fuente luminosa englobada en la semiesfera de medida. El valor porcentual relativo de flujo luminoso incidente en cada píxel se obtiene operando como indica la ecuación 4.1.11.

$$\phi_{\%} = \frac{\phi_{\text{píxel}_k}}{\phi_{\text{total}}} \times 100 \quad \text{Ecuación. 4.1.19}$$

Los sistemas ópticos capaces de registrar luz de toda una semiesfera son los objetivos gran angular, más concretamente, aquellos que pueden cubrir 180° (o más de campo) y que son denominados ojos de pez o fisheye como se suele encontrar en la literatura anglosajona. Con el objetivo enfocado a infinito y el plano del sensor situado en el plano focal imagen del objetivo, todos los rayos que incidan con la misma dirección alcanzarán el mismo píxel (figura 4.1.4). Este tipo de sistemas hacen uso de la oblicuidad de las pupilas así como su variación de tamaño aparente para reducir los efectos de pérdida de iluminación fuera de eje. Si este tipo de estrategias no se tuviesen en cuenta, el factor cuártico del coseno anularía la iluminación para valores superiores a los 60° de campo de visión.

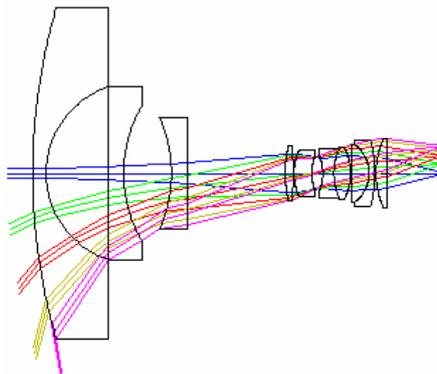


Fig. 4.1.9 Esquema ejemplo de objetivo gran angular. Wide angle lens 200 degree field [Zemax a 2010]

Los objetivos gran angular permiten realizar medidas fotométricas con grandes campos de visión dado que trabajan con pupilas de entrada cuya geometría y posición se aleja de los estudios de la óptica paraxial. Esta propiedad permite obtener un mayor campo de visión a la vez que afectan a la relación de aspecto del registro obtenido ya que presentan un efecto de distorsión notable. [Fallah 1996]

El hecho de que las pupilas de los sistemas ópticos gran angular presenten desviaciones respecto a su tamaño, oblicuidad y posición, obliga a conocer adecuadamente como se comporta este tipo de sistemas ópticos a lo largo de todo su campo de visión, ya que el aumento y la relación de área de objeto visto variarán de manera importante dependiendo de la posición en la que se encuentre. Este efecto conlleva inherentemente un cambio en la medida fotométrica, de modo que es necesario estudiar a fondo el comportamiento del sistema óptico empleado para realizar una correcta discretización angular de la medida fotométrica.

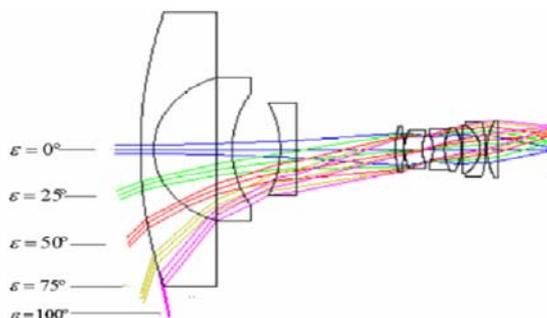


Figura 4.1.10. Variación del flujo luminoso de entrada en función del campo de visión para un sistema óptico tipo gran angular. Las aberraciones del sistema óptico afectan a la forma, la iluminación y el aumento de la imagen. En la figura se puede ver como a medida que el ángulo de elevación aumenta, el haz de luz que entra en el sistema es más estrecho, lo que se traduce en pérdidas de iluminación y aumento de las aberraciones. [Zemax a 2010]

4.1.2. Validez de la ley del cuadrado de la distancia en el principio de medida.

En la sección 4.1.1 se han definido todos los elementos y conceptos teóricos necesarios para describir de manera correcta y unívoca la estrategia de medida. En todo el razonamiento anterior se ha mantenido como premisa fundamental que las fuentes luminosas que configuran un entorno de medida se encuentra alejadas a los puntos de medida. El concepto alejado en fotometría implica ciertas restricciones dimensionales que se deben cumplir en todo el proceso de medida.

La ley que establece los límites de validez de una medida fotométrica en función de la distancia entre fuente y detector se conoce como ley del cuadrado de la distancia. La ley del cuadrado de la distancia se cumple estrictamente para el caso de las fuentes puntuales y para elementos infinitesimales de áreas receptora y emisora. Pero en la realidad, las fuentes

luminosas siempre tienen un tamaño finito. En esta sección se estudian los límites de validez de los razonamientos hechos anteriormente en la sección 4.1.1. [Wolfe 1998]

Para analizar la validez de la ley del cuadrado de la distancia en nuestro entorno de medida consideraremos una fuente circular de radio R (figura 4.1.11) que emite según la ley de Lambert [Smith 2007, Wolfe 1998, Marín 2009, Foote 1915, Palmer 2009] y determinaremos la iluminación producida en un punto P de una superficie A paralela a la fuente y situada a una distancia r.

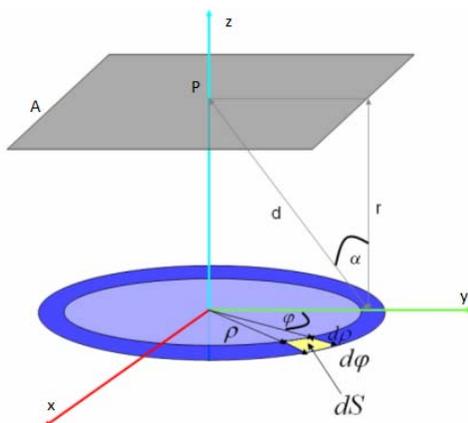


Figura 4.1.11 Esquema geométrico para el estudio de la validez de la ley fotométrica del inverso del cuadrado de la distancia.

Si descomponemos la fuente emisora (disco azul) en elementos diferenciales de área, se tiene, en coordenadas cilíndricas, que cada elemento de superficie se escribe como:

$$dS = \rho d\rho d\varphi \quad \text{Ecuación 4.1.20}$$

Donde dS es la superficie diferencial del elemento, ρ es la distancia radial respecto al centro geométrico de la fuente coincidente con el origen de coordenadas y donde $d\varphi$ es el ángulo subtendido por el elemento de área. Suponiendo que la fuente tiene una luminancia L, la intensidad de cada elemento diferencial de área en la dirección de incidencia será:

$$I_{\alpha} = L \cos(\alpha) \rho d\rho d\varphi \quad / \quad \cos(\alpha) = \frac{r}{d} \quad \text{Ecuación 4.1.21}$$

Donde α es el ángulo que forma la línea que une el punto donde se desea conocer la iluminación con el elemento de área con el eje z y r es la distancia entre la fuente y la superficie donde se desea conocer la iluminación a lo largo del eje z.

Por tanto, la iluminación elemental que este elemento de superficie produce en el receptor, teniendo en cuenta la ley del cuadrado de la distancia y el coseno del ángulo de incidencia.

$$dE = \frac{L \cos^2(\alpha) \rho d\rho d\varphi}{d^2} = L \frac{r^2}{(r^2 + \rho^2)^2} \rho d\rho d\varphi \quad \text{Ecuación 4.1.22}$$

Si integramos para toda la superficie emisora circular de radio R:

$$E = 2\pi L r^2 \int_0^R \frac{\rho d\rho}{(r^2 + \rho^2)^2} \quad \text{Ecuación 4.1.23}$$

Haciendo el cambio de variable:

$$x = r^2 + \rho^2; \quad dx = 2\rho d\rho \quad \Rightarrow \quad E = \pi L \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)} \right] \quad \text{Ecuación 4.1.24}$$

Y desarrollando en serie el corchete:

$$E = \pi L \left(\frac{R}{r}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 + \left(\frac{R}{r}\right)^4 - \dots \right] \quad \text{Ecuación 4.1.25}$$

La ecuación 4.1.25 es una expresión muy interesante y bien conocida como la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Esta ley es válida siempre y cuando las fuentes sean puntuales o presenten áreas tales que el cociente R/r es pequeño, ya sea porque el radio de la fuente (R) es pequeño o porque la distancia fuente - área de medida (r) es grande. [Palmer 2009, Wolfe 1998, Casas 1994]

Con el fin de evaluar la importancia de realizar el truncamiento de la serie en el segundo término, compararemos los valores de iluminación que se alcanzan cuando se incluye el término cuadrático o se deja de incluir la relación entre ambos valores, se puede escribir como:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1 = \pi L \left(\frac{R}{r} \right)^2 = \frac{LS}{r^2} \\ E_2 = \frac{LS}{r^2} - \frac{LS}{r^2} \left(\frac{R}{r} \right)^2 = \frac{LS}{r^2} \left(1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right) \end{array} \right. \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2} \quad \text{Ecuación 4.1.26}$$

La relación entre la iluminación considerando un solo término del desarrollo en serie y la iluminación calculada con los dos primeros términos depende de los tamaños de fuente y distancia a las mismas desde el punto de medida. Una fuente luminosa tiene un tamaño típico del orden de centímetros, y la distancia fuente-sensor según el principio de medida propuesto abarca las decenas de metros. Esto significa que entre ambas magnitudes existe una diferencia de dos órdenes de magnitud y por tanto, para este caso particular la diferencia en la medida no presenta un error significativo con respecto al caso ideal.

Se puede calcular el error cometido en la medida teniendo en cuenta solo el primer término del desarrollo en serie de la ley del cuadrado de la distancia para una fuente luminosa de unos 70 cm de diámetro situada a 4m de la posición de medida:

$$100 \times \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right) = 100 \times \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2} - 1 \right) = 100 \times \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{0.7m}{4m} \right)^2} - 1 \right) = 3.2\% \quad \text{Ecuación 4.1.27}$$

Un error del 3% es un valor que está dentro de las tolerancias típicas de medidas fotométricas establecidas [UNE-EN 13201-2/3/4]. Por tanto, la ley del inverso del cuadrado de la distancia garantiza que la estrategia de medida fotométrica propuesta es válida. Existen otros criterios más severos que apuestan por reducir el error calculado en 4.1.27 por debajo del 1%, sin embargo, no existe un criterio internacional unificado respecto a esta discusión.

En las secciones 4.1.1 y 4.1.2 se ha presentado la estrategia de medida y su validez respectivamente. Se ha de estudiar a continuación, cómo es propagada la información de la medida hacia otros planos de interés. Para determinar la propagación de la medida fotométrica, se ha de estudiar en primer lugar el sistema de muestreo del plano de registro en el entorno de medida para garantizar una correcta propagación de toda la información. El muestreo y la propagación son por tanto, el objetivo de la sección 4.1.3.

4.1.3.- Muestreo y propagación de la medida

Como se ha podido ver en el estado del arte, la legislación establece unos métodos de medida donde se definen la cantidad necesaria así como la localización (x, y, z) de los puntos de medida de la iluminación con respecto al plano de registro [UNE-EN 13201-3, ITC-EA-07 2008]. De esta manera, quedan definidas las retículas de medida y en consecuencia el muestreo del plano de registro para toda la casuística en las vías públicas.

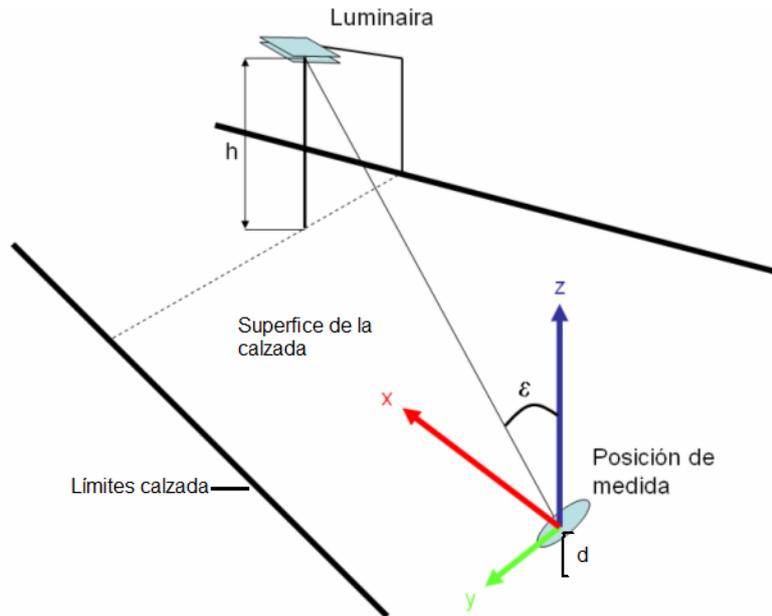


Figura 4.1.12 Esquema general de la medida de la iluminancia para una posición de medida arbitraria de la retícula de medida en el plano de registro. La posición de medida muestra un punto cualquiera situado dentro de los márgenes de la calzada a una altura determinada d , la superficie donde se desea conocer la iluminación es la superficie de la calzada.

La iluminancia en un punto de la vía se calcula a partir de la expresión UNE-EN 13201-3]:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{I \cdot \cos^3(\varepsilon)}{h^2} \quad \text{Ecuación 4.1.28}$$

Siendo I la intensidad, ε el ángulo formado por la dirección de incidencia en la posición de medida con la vertical y h la altura de la luminaria. El sumatorio comprende todas las luminarias de la instalación.

La retícula formada por las posiciones de medida se obtiene a partir de la figura 4.1.13:

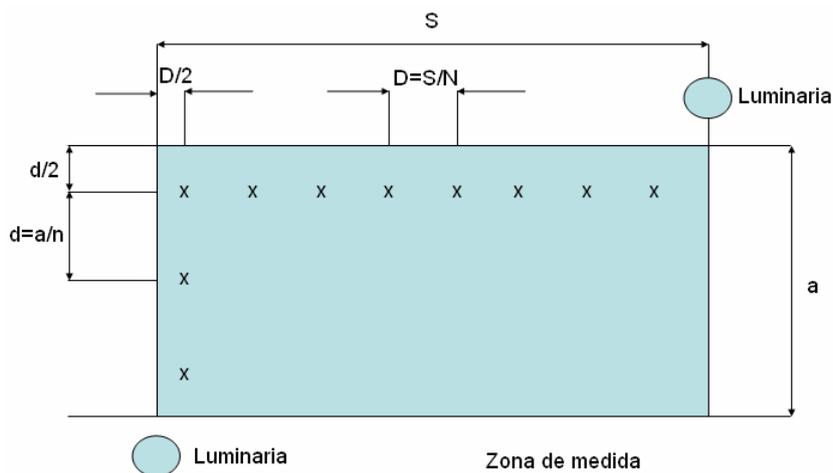


Figura 4.1.13. Retícula de las posiciones de medida. [UNE-EN 13201-3]

Donde S es la separación entre dos puntos de luz consecutivos. Las “x” representan las posiciones de medidas en el plano de registro. El parámetro “a” hace referencia al ancho del área aplicable, “n” es el número de posiciones de medida en la dirección transversal y “N” el número de posiciones de medida en la dirección longitudinal.

Las posiciones de medida se disponen uniformemente separadas y cubriendo toda el área aplicable, como se muestra en la figura anterior, donde “D” no puede ser superior a 3m y “d” no puede ser superior a 1m. El mínimo de puntos en la dirección longitudinal “N” será de 3. [ITC-EA-07 2008]

También se establece en la normativa el concepto de área límite. El área límite es aquella superficie definida por una distancia al punto de medida 5 veces la altura de montaje h de las luminarias de la instalación considerada. Cualquier luminaria que no pertenezca a dicha instalación y se encuentre dentro del área límite deberá ser apagada durante el proceso de medida. [UNE-EN 13201-3]

En cuanto a entornos de medida de forma irregular, es necesario elegir un campo de cálculo rectangular que contenga el entorno en cuestión y por ello sea mayor que el mismo. Las posiciones de medida de la retícula deben ser elegidas a partir del método mostrado en la figura 4.1.13, siendo aptas para la medida solamente aquellas que se encuentren dentro del límite del entorno en cuestión. En ningún caso, la separación en cualquier dirección de las posiciones de medida excederá 1.5 m. También existen entornos de medida que son considerados como excepciones tales como glorietas cuya retícula de medida queda determinada por otros criterios adicionales. [UNE-EN 13201-3]

Es necesario obtener la distribución de iluminación sobre superficies como el propio suelo o a una distancia de 200 mm como establece la normativa. [UNE-EN 13201-4] Para conocer los datos fotométricos en éstas y otras superficies de interés, se ha desarrollado un método de propagación de la información fotométrica obtenida en cada posición de medida.

Por cada punto de medida se realiza un registro que se compone dos tipos de información. Por una lado el valor de iluminación proporcionado por el luxómetro, y por otro la distribución geométrica del flujo luminoso que contribuye a dicho valor de iluminación proporcionada por la cámara y el objetivo gran angular. Dado que se desea conocer la iluminación en otras superficies, se debe analizar el método de propagación de la información asociada a cada uno de los dos parámetros, valor de iluminación y distribución geométrica.

Se estudia en primer lugar, la propagación de la cantidad total de la iluminación. Para ello, se ha de considerar que las luminarias se encuentran lo suficientemente alejadas como para considerarlas objetos puntuales. La ecuación 4.1.19 establece esta condición. Sea por tanto una fuente puntual S , que subtiende un ángulo ω y que ilumina un área A que forma un ángulo de inclinación ε con respecto al eje que une la fuente con el centro de la superficie. (Figura 4.1.14)

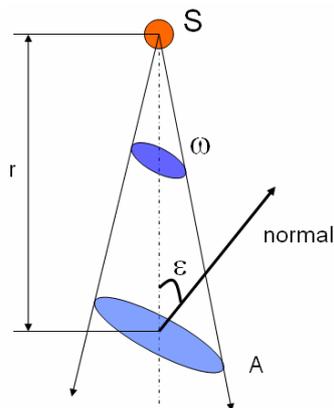


Figura 4.1.14. Propagación del flujo luminoso a través de una superficie arbitraria. La figura representa una fuente luminosa S cuya emisión de flujo se define angularmente a partir del ángulo sólido ω . Este ángulo sólido presenta una superficie A distinta en función de la distancia r a la que se encuentre con respecto a la fuente. El ángulo sólido visto desde la fuente variará según el ángulo de inclinación ε que presente la superficie A , siendo máximo cuando el ángulo ε se anule y mínimo cuando sea perpendicular a la línea que une el centro de la superficie con la fuente luminosa S .

La intensidad luminosa se define como:

$$I = \frac{d\Phi}{dw} \quad \text{Ecuación 4.1.29}$$

Donde el numerador es el flujo luminoso emitido y el denominador hace referencia al ángulo sólido sobre el cual es emitido dicho flujo. Por otra parte, la iluminación en una superficie S se calcula como:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{Ecuación 4.1.30}$$

Donde nuevamente el numerador es el flujo que llega a la superficie y el denominador es el área donde incide dicho flujo. El ángulo sólido puede expresarse de manera genérica según la ecuación 4.1.31:

$$dw = dS \frac{\cos(\varepsilon)}{r^2} \quad \text{Ecuación 4.1.31}$$

Donde el argumento de la función coseno es la inclinación de la superficie respecto a la línea que une el centro de la superficie con la fuente (normal) y r es la distancia entre fuente y superficie. Se puede escribir finalmente, como se ha visto en la sección 4.1.2, que la iluminación puede obtenerse como una expresión matemática que depende de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la superficie y la fuente.

$$E = I \frac{\cos(\varepsilon)}{r^2} \quad \text{Ecuación 4.1.32}$$

La ecuación 4.1.32 también es conocida en radiometría como la ley del inverso del cuadrado de la distancia, con esta ecuación y conocida la iluminación en al menos un punto de un plano, el valor de la misma se puede propagar hacia otros planos de interés conocida la distancia existente entre ellos.

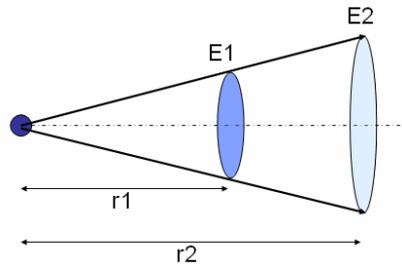


Figura 4.1.15. Esquema de variación de la iluminación entre dos planos E1 y E2 situados a distancias distintas r_1 y r_2 de una fuente. El plano E1 presenta un color azul más intenso que el plano E2 para notar que la iluminación es mayor cuanto más cerca esté el plano de la fuente.

Sea E_1 la iluminación en el plano situado a una distancia r_1 y E_2 la iluminación en el plano situado a una distancia r_2 . Según 4.1.32, la relación entre ambas iluminaciones se obtiene de la forma:

$$E_r = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{Ecuación 4.1.33}$$

Y por tanto:

$$E_r = \frac{I \frac{\cos(\varepsilon_2)}{r_2^2}}{I \frac{\cos(\varepsilon_1)}{r_1^2}} = \frac{\cos(\varepsilon_2) / r_2^2}{\cos(\varepsilon_1) / r_1^2} \Rightarrow E_r = \frac{\cos(\varepsilon_2)}{\cos(\varepsilon_1)} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.1.34}$$

El valor de la iluminación en un nuevo plano p de medida, conocido el valor en un plano de registro m , se obtiene como el producto entre el cociente de los cosenos de los ángulos de inclinación y del cuadrado del cociente de distancias a la fuente de los planos de registro e interés.

$$E_p = \frac{\cos(\varepsilon_p)}{\cos(\varepsilon_m)} \left(\frac{r_m}{r_p} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.1.35}$$

La propagación de la distribución geométrica se determina propagando la dirección de haces estrechos de luz que inciden en el sensor una vez han atravesado el sistema óptico enfocado a infinito. [Arranz 2005] La energía captada por cada píxel, considerando su reducido tamaño, se puede considerar que solo proviene de una sola dirección caracterizada por los ángulos acimut y elevación.

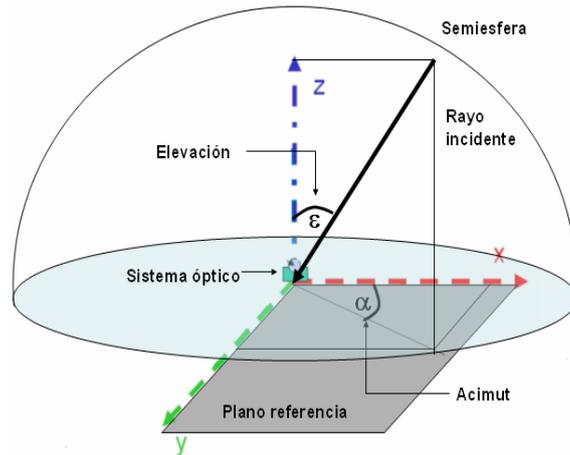


Fig. 4.1.16 Definición de los ángulos acimut y elevación en la semiesfera de medida.

De esta forma, cada uno de los píxeles del sensor se comporta como una célula fotométrica individual aportando información no solo de cantidad de energía, sino también información geométrica de la procedencia del haz de luz que incide sobre él.

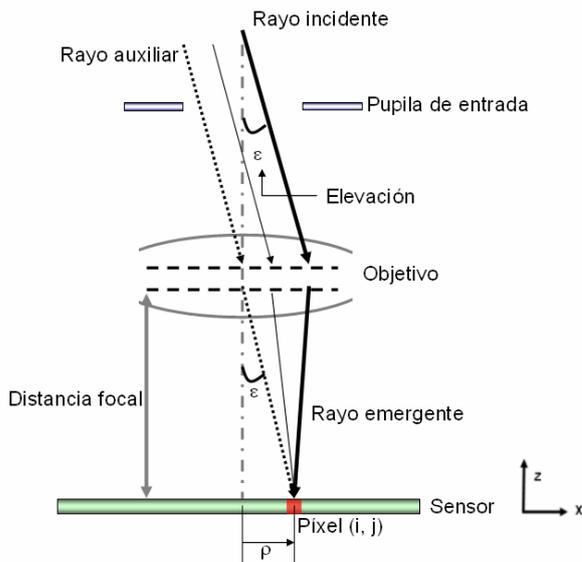


Fig. 4.1.17 Incidencia de un haz de luz sobre un píxel del sensor colocado en el plano focal del sistema óptico enfocado a infinito.

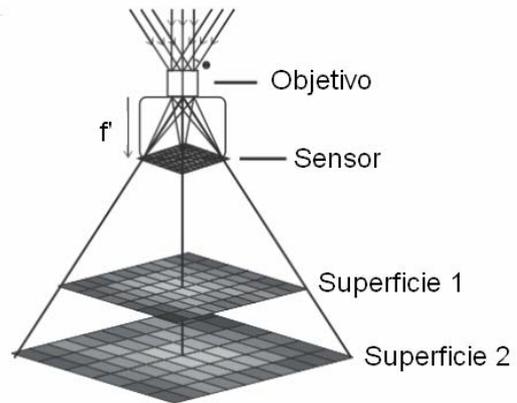


Figura 4.1.18. Determinación de la dirección de incidencia en función de la posición de los píxeles del sensor. [POL 2009]

Bajo esta condición, la dirección correspondiente al ángulo de elevación ε del haz se halla a partir de la posición del píxel (i, j) y su distancia al objetivo, que es igual a la distancia focal del mismo (f'), ambas conocidas.

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\sqrt{i^2 + j^2}}{f'}\right) = \arctan\left(\frac{\rho}{f'}\right) \quad \text{Ecuación 4.1.36}$$

En general, y debido a la distorsión de barril típica que presentan los objetivos gran angular, la coordenada radial ρ no será el producto de una constante por el píxel analizado, sino que dependerá de la distorsión del sistema y en general se puede escribir como:

$$\rho = \rho(\varepsilon) = \sum_{n=0}^m \rho_n \varepsilon^n \quad \text{Ecuación 4.1.37}$$

Donde m es la cantidad total de coeficientes del polinomio que describe la función, ρ_n son los coeficientes del polinomio y ε^n es el valor de la variable de orden n-ésimo del polinomio.

Mientras que el acimut, se obtiene como:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{i(\varepsilon)}{j(\varepsilon)}\right) \quad \text{Ecuación 4.1.38}$$

Donde el numerador y el denominador son, en general, funciones similares a la de la ecuación 4.1.32 tal que:

$$\begin{aligned} i &= i(\varepsilon) = \sum_{n=0}^m i_n \varepsilon^n \\ j &= j(\varepsilon) = \sum_{n=0}^m j_n \varepsilon^n \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.1.39}$$

El mapa de la distribución geométrica luminosa sobre el sensor puede ser propagado, gracias al conocimiento de las direcciones de los haces, a cualquier otra superficie a partir del conocimiento de las intersecciones de los haces con el nuevo plano de interés (figura 4.1.19).

Dado que los planos de interés para el análisis y medida de la iluminación en la vía pública son planos paralelos al suelo, limitaremos nuestro desarrollo a esta configuración de superficies.

Sea por tanto un plano de nodos situado a una distancia de propagación d del plano de la medida. Se supone que el plano de la medida (suelo) donde se desea conocer la iluminación está segmentado en celdas cuadradas de lado L . Así, en cada punto de registro (x_r, y_r) (ver figura 4.1.1) y para cada píxel del registro fotométrico en el plano focal del

sistema, la información se propagará hacia unas nuevas coordenadas en el plano de medida según las ecuaciones:

$$x_m = x_r + d \tan(\varepsilon)$$

$$y_m = y_r + \frac{x_m}{\tan(\alpha)}$$

Ecuación 4.1.40

La cantidad de energía que será propagada a cada una de las cuadrículas se hará en función del valor de gris alcanzado por cada píxel y su localización espacial en el plano de medida vendrá dada por las coordenadas propagadas de cada píxel según las ecuaciones 4.1.41.

La figura 4.1.20 expone una cuadrícula de una superficie de medida. Para comprender mejor la figura 4.1.20, se debe pensar en una vista cenital de la vía, como se muestra en la figura 4.1.1.

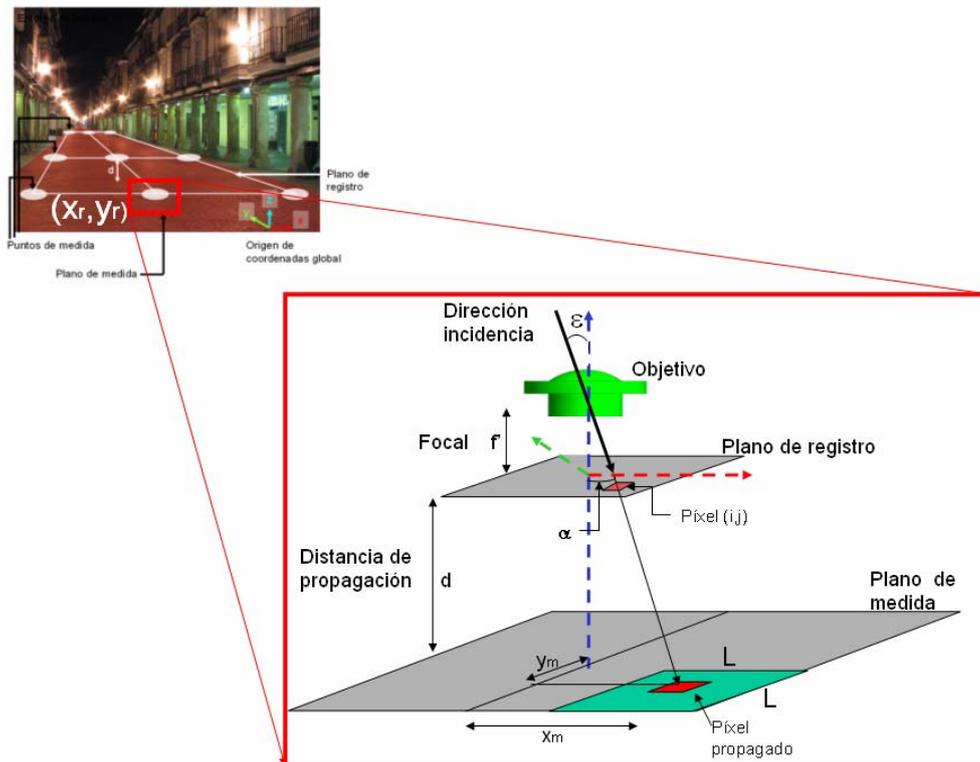


Figura 4.1.19. Propagación de la información obtenida desde el plano de registro al plano de medida. El píxel (i, j) correspondiente a una dirección de incidencia ε alcanzará un valor de gris determinado que corresponderá a un valor de flujo luminoso por unidad de área. El valor del flujo luminoso, una vez conocida el área del píxel, podrá ser propagado hacia el plano de medida hasta las coordenadas (x_m, y_m) según las ecuaciones 4.1.36. Se efectuará este proceso para cada píxel en cada posición de medida (x_r, y_r) .

El círculo de color verde situado en la esquina inferior derecha establece el origen de coordenadas global de todos los puntos de medida, mientras que el círculo azul claro representa una posición de medida a analizar (marcada con un 0), las celdas cuadradas de longitud L adyacentes a la posición de medida a analizar son las zonas geométricas donde la iluminación será propagada, éstas se encuentran numeradas para la asignación de la energía asociada a cada píxel. El resto de círculos también representan posiciones de medida donde el proceso de propagación de la información se evalúa de manera idéntica.

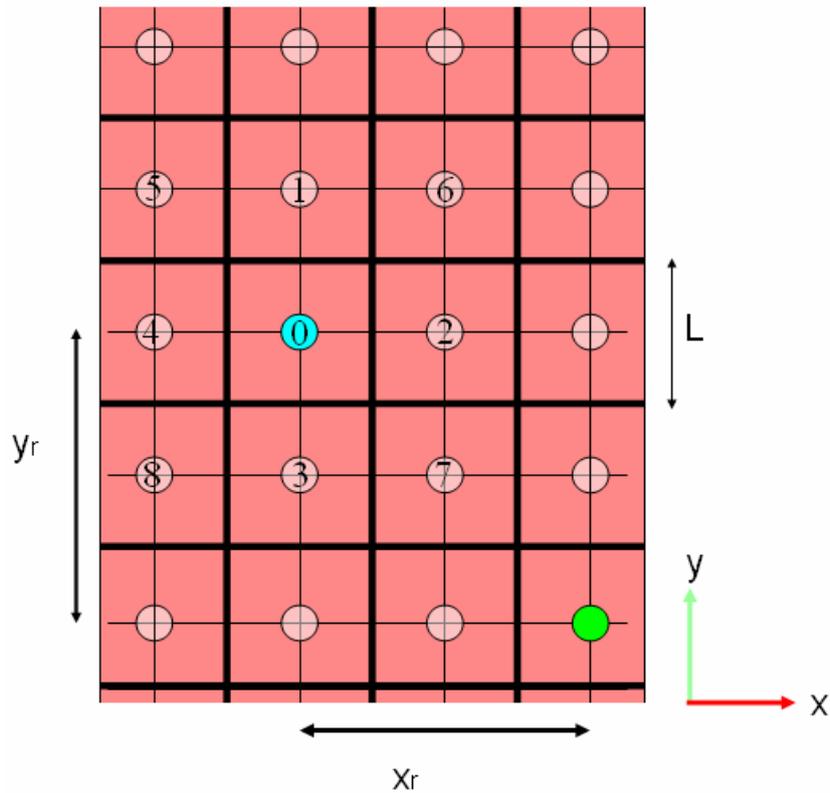


Figura 4.1.20. Vista cenital del plano de registros. El plano de registro se encuentra compuesto por las posiciones de medida que establecen los nodos (círculos en la imagen). La información obtenida desde el plano de registro puede ser propagada a cualquier otra superficie de interés donde se establezca la medida deseada de la iluminación. La superficie de interés o plano de medida se encuentra teselada en celdas cuadradas de longitud L donde se determina qué cantidad de iluminación incide sobre cada una de ellas.

El criterio de asignación de un píxel a una cuadrícula se expresa en función de las dimensiones de las celdas cuadradas de longitud L y de la altura d para cada posición de medida.

Una vez conocidos los parámetros ε y L y la relación entre los ángulos de elevación y acimut y las coordenadas i y j de los píxeles, se pueden escribir las ecuaciones que establecen las condiciones matemáticas de asignación de píxeles a cada cuadrícula en las que ha sido segmentado el plano de medida. Para el caso contemplado en la figura 4.1.20 se concluye que:

$$\begin{aligned}
 & \text{si } |d \tan(\varepsilon)| \leq \frac{L}{2} \quad \text{y} \quad \left| \frac{x_m}{\tan(\alpha)} \right| \leq \frac{L}{2} \Rightarrow E \in (\text{celda } 0) \\
 & \text{si } |d \tan(\varepsilon)| \leq \frac{L}{2} \quad \text{y} \quad \pm \frac{L}{2} < \frac{x_m}{\tan(\alpha)} \leq \pm \frac{3}{2} L \Rightarrow E \in \begin{cases} +(\text{celda } 1) \\ -(\text{celda } 3) \end{cases} \\
 & \text{si } \left| \frac{x_m}{\tan(\alpha)} \right| \leq \frac{L}{2} \quad \text{y} \quad \pm \frac{L}{2} < d \tan(\varepsilon) \leq \pm \frac{3}{2} L \Rightarrow E \in \begin{cases} +(\text{celda } 2) \\ -(\text{celda } 4) \end{cases} \\
 & \text{si } \pm \frac{L}{2} < d \tan(\varepsilon) \leq \pm \frac{3}{2} L \quad \text{y} \quad \pm \frac{L}{2} < \frac{x_m}{\tan(\alpha)} \leq \pm \frac{3}{2} L \Rightarrow E \in \begin{cases} --++(\text{celda } 5) \\ ++++(\text{celda } 6) \\ ++--(\text{celda } 7) \\ ----(\text{celda } 8) \end{cases}
 \end{aligned}$$

Ecuación 4.1.41

Las ecuaciones 4.1.36 acotan qué número de píxeles, y por tanto qué cantidad de energía, es propagada a las distintas cuadrículas o regiones del plano de medida. De esta forma, es posible obtener los mapas de iluminación sobre los planos de medida analizando la dirección de incidencia de la luz, cumpliéndose así uno el objetivo principal de esta tesis doctoral.

4.2 Discretización angular de la medida fotométrica.

La principal característica del dispositivo desarrollado es la capacidad de obtener la cantidad y dirección de energía que contribuye a la iluminación en una posición determinada. El dispositivo, mediante un objetivo gran angular que trabaja conjuntamente con un sensor digital, cuantifica angularmente la medida fotométrica. El procedimiento de medida determina, mediante el objetivo enfocado a infinito, la energía procedente de cada una de las direcciones de incidencia sobre la posición de medida. El sensor se sitúa en el plano focal del objetivo de manera que cada píxel corresponde a un pequeño haz de luz que incide con una

dirección determinada. A partir de la posición de cada píxel en el sensor y el nivel de gris alcanzado se obtiene la distribución geométrica y cantidad porcentual de la energía medida.

Esta sección queda dividida en tres puntos fundamentales. En el primero de ellos se establece el lugar geométrico del registro fotométrico de la medida, se presenta el proceso de digitalización de la medida y se exponen los conceptos fundamentales de la misma: la resolución angular, el muestreo de la señal, el tipo de sensor empleado y las implicaciones que comporta el uso de objetivos gran angular. En el segundo punto, se realiza el análisis energético de la medida. Finalmente, en el tercer punto se expone el cómputo total de la energía y su correlación con la discretización angular que hará posible calcular la contribución porcentual al valor total de la medida en cada dirección.

4.2.1. Digitalización angular de la medida fotométrica.

Como se ha comentado anteriormente, el dispositivo propuesto ha de caracterizar la emisión de un conjunto de fuentes luminosas de un entorno de medida determinado. El dispositivo determina las pendientes de haces estrechos de luz enfocando a infinito el objetivo gran angular acoplado a un sensor, en este caso una cámara digital. La energía captada por cada píxel, considerando su reducido tamaño, solo proviene de una sola dirección. El ángulo de incidencia del haz caracterizado por la pareja de ángulos elevación y acimut (ε, α) se halla a partir de la coordenada del píxel (i, j) y su distancia al objetivo, que es igual a la distancia focal del mismo y donde ambos parámetros son conocidos.

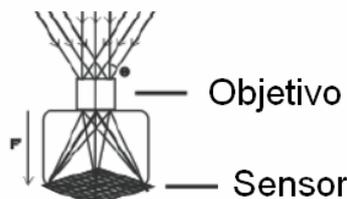


Figura 4.2.1. Determinación de la dirección de incidencia de los haces de luz. [POL 2009]

La retícula de píxeles que conforman el sensor discretiza el registro descomponiéndolo en pequeñas celdas planas coincidentes con cada uno de los píxeles. De esta forma el registro fotométrico es digitalizado.

El número máximo de puntos con que es muestreado el registro fotométrico responde a la relación entre el área del registro fotométrico y el área de los píxeles del sensor:

$$N_{\max} = \frac{S_{\text{registro_fotométrico}}}{S_{\text{píxel}}} = \frac{\pi \cdot r_r^2}{d_p^2} \quad \text{Ecuación 4.2.1}$$

Donde r_r es el radio (en mm) del registro fotométrico sobre el plano del sensor y d_p es la dimensión del píxel (considerándolo como un cuadrado). El número de direcciones (puntos) de muestreo varía en función de la óptica y del sensor empleado aunque los valores típicos oscilan en torno a los 10^5 puntos para cámaras con formato de $\frac{1}{2}$ " pulgada y un tamaño típico de píxel de 5micras. El número de puntos de muestreo establece intervalos angulares del orden de 10^{-1} grados.

Existen otros tipos de formato de sensores digitales, cada uno de los cuales con diferentes tamaños de píxel según sea su aplicación. En la figura 4.2.2 pueden verse cuatro tipos distintos que van desde el formato de $\frac{1}{2}$ " hasta el de 35mm pasando por el 4/3 system y el APS-C de Canon. Tamaños de píxel típicos utilizados por fabricantes y proveedores como Canon u Olympus oscilan entre los 5.20um del formato de $\frac{1}{2}$ ", los 5.30um del 4/3 o los 6.40um y 8.48um del APS-C y del 35mm respectivamente.

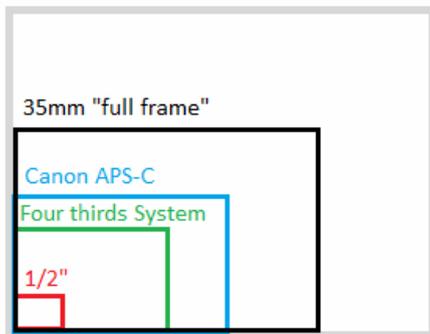


Figura 4.2.2. Ejemplo de cuatro formatos estándar de sensores digitales. Cada uno de ellos presentan distintos tamaños de píxeles en función de la aplicación para la cual hayan sido diseñados. [DxoMark 2012]



Figura 4.2.3 Gráfica del número total de píxeles que contiene cada uno de los formatos en base a los tamaños de píxel de 5.30, 5.20, 6.40 y 8.48um respectivamente. Los valores oscilan entre 1Mp y 6 Mp aproximadamente.

Estos valores combinados con las dimensiones de los sensores hacen que el registro presente un mayor o menor muestreo en cuanto al número de píxeles totales que lo conforman. La gráfica 4.2.3 muestra como el sensor de $\frac{1}{2}$ " pulgada en combinación con un

tamaño de píxel de 5.2um se encuentra por debajo de 1Mpíxel, mientras que para un formato 4/3 o APS-C con tamaños de 5.3 y 6.4um el registro presenta un valor de 4Mpíxel aproximadamente. Finalmente, si se aumenta el tamaño del sensor hasta un 35mm combinado con un píxel de 8.48um, el valor del número total de píxeles aumenta hasta los 6Mpíxel

4.2.2. Ecuación angular de correspondencia energética.

A partir de la discretización angular que realizan el propio pixelado del sensor y objetivo seleccionados, se fija un número total de direcciones (puntos) constante en todos los registros. Esta operación permitirá simplificar los cálculos posteriores. Para hallar el número total de direcciones (puntos) para un registro fotométrico se consideran todos aquellos píxeles contenidos en un círculo circunscrito al área del sensor que corresponden al registro fotométrico.

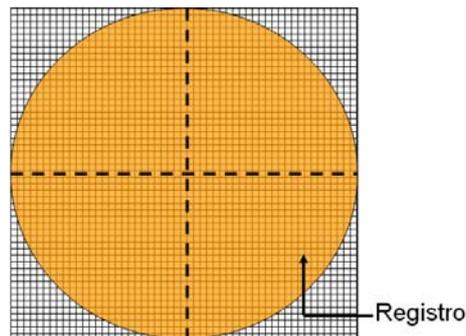


Figura 4.2.4 Muestreo del registro fotométrico del dispositivo sobre el plano focal (plano del sensor). Los píxeles que se encuentren en el interior del área circular de color naranja corresponden a cada una de las direcciones angulares discretizadas que son recogidas en cada uno de los puntos de medida.

Cada píxel representa una dirección de incidencia de la luz en cada punto de registro teniendo como referencia una semiesfera centrada en dicho punto. La relación entre las coordenadas de los píxeles y el ángulo de elevación correspondiente no es lineal cuando se emplean objetivos gran angular (ecuación 4.1.37, 4.1.38 y 4.1.39). Debe estudiarse por tanto los efectos introducidos por el sistema óptico, ya que la distorsión y la transmitancia del objetivo gran angular son parámetros que introducirán cambios importantes en cómo se registra la información fotométrica.

La figura 4.2.5 presenta, para una misma dirección de incidencia, un esquema con un doble trazado de rayos donde se puede ver como el píxel que debería ser iluminado si el sistema óptico careciese de distorsión (en rojo) pasa a ser otro píxel en presencia de dicha

aberración (en azul). Dicho de otro modo, la distancia a la cual se encuentra el píxel iluminado es mayor cuando aparece el efecto de distorsión. Si este efecto se representa no solo para una dirección de incidencia (ε) sino para todo el campo de visión desde 0 a 90 grados, la gráfica que resulta es la que aparece en la figura 4.2.6.

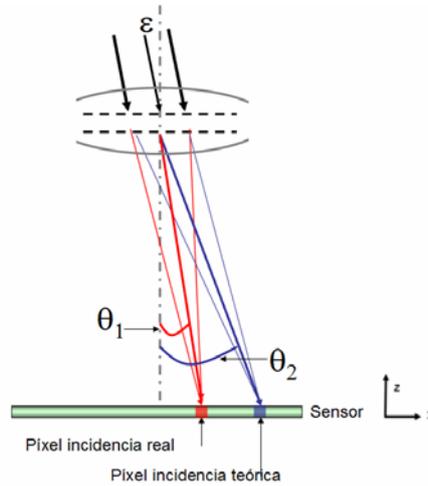


Figura 4.2.5 Variación de la posición de los píxeles iluminados sobre el plano del sensor debido al efecto de la distorsión introducida por el objetivo gran angular para una dirección determinada.

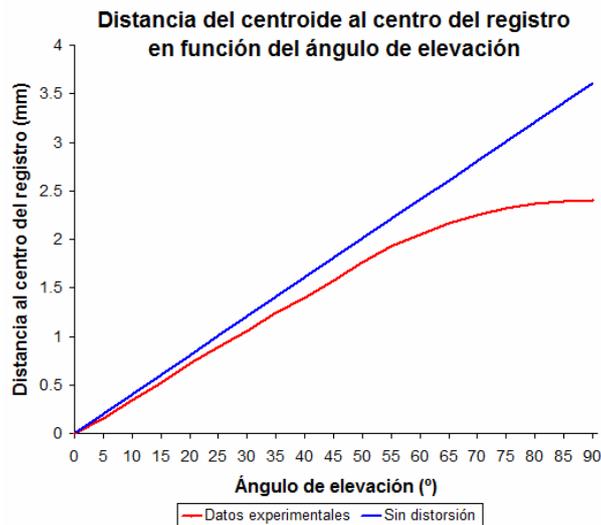


Figura 4.2.6 Representación de la distancia de la imagen al centro del registro para dos casos particulares a lo largo de todo el campo de visión. Sistema óptico con distorsión en barril (rojo) y sistema óptico sin distorsión (azul).

La gráfica mostrada en 4.2.6 representa, por un lado y en ordenadas, la distancia en milímetros de los píxeles iluminados al centro del registro (figura 4.2.4) para los casos analizados anteriormente (con distorsión y sin distorsión) mientras, que en abcisas se muestra el ángulo de elevación cuyo recorrido está acotado entre 0° y 90° . La distorsión en barril

provoca que la posición del píxel iluminado al que correspondería la dirección de incidencia sea menor de lo esperado.

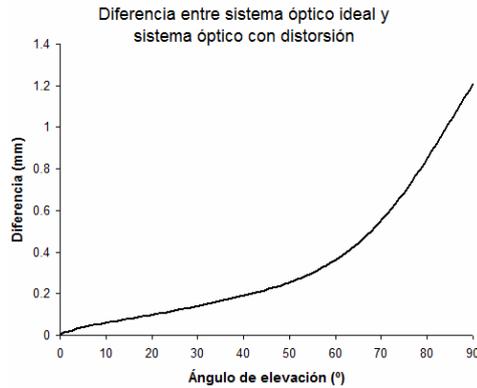


Figura 4.2.7 Diferencia entre las curvas contempladas en la figura 4.2.6 La distorsión en barril provoca una diferencia que aumenta conforme lo hace el ángulo de elevación.

Es interesante ver cómo se comporta la diferencia entre las curvas de la figura 4.2.6. Si se representa la diferencia relativa entre las dos curvas, se obtiene la gráfica (Fig. 4.2.7). En ella se observa un comportamiento de tipo exponencial, la diferencia es nula en el origen del campo de visión, es decir, a 0° . La diferencia en el extremo del campo de visión aumenta según lo hace el ángulo de elevación, lo que significa que la información fotométrica queda más comprimida cuanto mayor sea este ángulo.

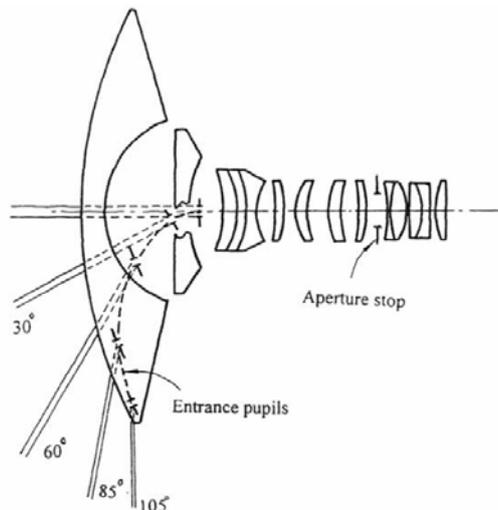


Figura 4.2.8 Variación de la posición de las pupilas de entrada para el diseño de un sistema óptico de un objetivo gran angular. En este esquema se puede apreciar cómo la geometría de las pupilas de un sistema óptico queda totalmente alejada de la predicción que se obtiene con la óptica paraxial. [Fallah 1996]

El origen de este comportamiento esta ligado a la posición y orientación de las pupilas del sistema. Precisamente este comportamiento de la posición e inclinación de pupila habilita la posibilidad de diseñar sistemas ópticos gran angular. La posición, inclinación y tamaño de las pupilas de entrada y salida no se corresponden con las establecidas por la teoría de la óptica paraxial. Para cada ángulo de elevación, los haces de luz entrarán y saldrán del sistema óptico por pupilas de entrada y salida con geometrías y posiciones distintas (figura 4.2.8) [Fallah 1996, Smith 2007, Laikin 2001]. Lo mismo ocurre con los planos principales de dichos sistemas, así como con todos los parámetros ópticos de análisis que son utilizados durante el proceso de diseño.

Normalmente, y a no ser que el sistema óptico haya sido diseñado por el propio usuario, los parámetros ópticos fundamentales de dichos sistemas son desconocidos. Las pupilas, lucarnas, planos principales etcétera dejan de ser superficies planas perpendiculares al eje óptico axial de los sistemas, para convertirse en general en superficies curvas con posiciones, tamaños e inclinaciones diferentes a las esperadas paraxialmente. Debido a ello, no es factible establecer un estudio analítico de las propiedades del sistema óptico. Sin embargo, a través de pruebas de validación, es posible conocer y elaborar una parametrización correcta de los sistemas ópticos que garantiza su correcta utilización en el proceso de la medida fotométrica.

En la sección 4.1.1 se ha descrito matemáticamente la iluminación en el plano focal de un sistema óptico en función de la dirección de procedencia de la luz incidente sobre dicho sistema. La ecuación 4.1.13 puede ser escrita, en forma angular como:

$$E_{\text{pixel}(i,j)} = T(\alpha', \varepsilon') \cdot L'(\alpha', \varepsilon') \frac{\beta_P^2 S_{P.E}}{f'^2} \cos^4(\varepsilon') \quad \text{Ecuación. 4.2.2}$$

La expresión 4.2.2 es conocida como ley de la cuarta potencia del coseno y su validez es tanto mayor cuanto mayor sea la distancia del plano imagen a la pupila de salida en comparación con el diámetro de ésta. Esta condición no se cumple de manera generosa en los sistemas gran angular donde la distancia focal es corta, además, la pupila de entrada y salida varía su geometría a lo largo de todo el campo de visión. Cuando el diámetro de la pupila de salida es comparable a la distancia de sí misma al plano imagen, la ecuación 4.2.2 presenta resultados poco precisos. [Palmer 2009]

P. Foote 1915, calculó analíticamente el caso que contempla cuando el diámetro de la pupila de salida no puede ser considerado como mucho más pequeño que la distancia de la pupila de salida al plano imagen.

P. Foote obtuvo la ecuación 4.2.3, que proporciona valores correctos tanto si el tamaño de la pupila puede ser considerado grande o pequeño en relación con la distancia a la imagen. [Palmer 2009, Smith 2007, Foote 1915]

$$E(\varepsilon, \alpha) = \frac{\pi L}{2} \left[1 - \frac{(1 + \tan^2 \alpha - \tan^2 \varepsilon)}{\left[\tan^4 \alpha + 2 \tan^2 \alpha (1 - \tan^2 \varepsilon) + \frac{1}{\cos^4 \varepsilon} \right]^{1/2}} \right] \quad \text{Ecuación 4.2.3}$$

La ecuación 4.2.3 corrige la ley de la cuarta potencia del coseno permitiendo evaluar la iluminación a grandes ángulos de elevación. Es por tanto una expresión más apropiada que 4.2.2 y conocida en la literatura como la ley de la cuarta potencia del coseno aunque realmente la ley de la cuarta potencia del coseno, no es en sí una ley sino más bien una combinación de factores coseno que pueden combinarse según la situación radiométrica a analizar.

Sin embargo, la ecuación 4.2.3 no tiene en cuenta parámetros fundamentales que definen la aberración de pupila en los sistemas gran angular, a saber: el desplazamiento, la inclinación con respecto al eje del sistema y el tamaño de la misma que varían a lo largo del campo de visión. Por tanto, la ecuación 4.2.2 debe ser generalizada para poder proporcionar la misma información que 4.2.3 teniendo en cuenta además los efectos de aberración de pupila ya comentados. A continuación se aborda esta generalización.

La iluminación de un píxel está directamente relacionada con la cantidad de energía que incide sobre él para una dirección determinada. La iluminación se traduce en un nivel de gris que, dependiendo del sensor, tendrá uno u otro valor. Si el sistema óptico es iluminado angularmente de forma isótropa, la cantidad de flujo luminoso por unidad de ángulo sólido y área será la misma sea cual sea la dirección de incidencia en el plano de la pupila de salida. Dado que el sistema óptico es de revolución, se puede prescindir en este análisis del ángulo de acimut y por tanto, la ecuación 4.2.2 queda entonces como:

$$E_{\text{pixel}(i,j)} = T(\varepsilon') \cdot L' \frac{\beta_P^2(\varepsilon') S_{P.E}(\varepsilon')}{f'^2(\varepsilon')} \cos^4(\varepsilon') \quad \text{Ecuación 4.2.4}$$

La expresión anterior es la ecuación angular de correspondencia energética. La expresión permite obtener la iluminación que incide sobre el sensor para cada ángulo de elevación. No obstante y como se comentó en el punto 4.1, ésta es una ecuación aproximada y válida en un entorno donde se pueda suponer las dimensiones de la pupila pequeñas con respecto a la distancia entre ella y el plano imagen. En la ecuación 4.2.4 se ha introducido la dependencia angular del aumento pupilar y el valor de la superficie de la pupila de entrada así como la dependencia angular de la focal del sistema.

Los sistemas gran angular que presentan grandes aperturas, como los diseños contemplados en este trabajo, cuyo campo de visión es de 180°, hacen uso de estrategias de diseño para optimizar la captación de flujo luminoso a grandes ángulos de apertura permitiendo así no tener zonas oscuras en los bordes del plano imagen. Por ello, la expresión 4.2.4 que depende de la cuarta potencia del coseno de elevación debe ser modificada para tener en cuenta todos estos aspectos de diseño de los sistemas ópticos gran angular.

Se ha de estudiar cómo varían todos y cada uno de los parámetros involucrados en 4.2.4, a saber, la dependencia angular de la transmitancia del sistema óptico, la dependencia angular de la distancia focal, la inclinación y tamaño de pupila en función del ángulo de elevación y la relación radiométrica de oblicuidad en los sistemas ópticos gran angular, (coseno a la cuarta potencia).

- Transmitancia.

La transmitancia de los sistemas ópticos tipo gran angular varía, de forma no lineal, con el valor del angular del campo, es decir depende del ángulo de elevación, siendo máxima en el eje del sistema óptico y mínima en el extremo del campo. La transmitancia disminuye de forma monótona y depende exclusivamente del ángulo de elevación ya que el sistema óptico es de revolución. La variación de transmitancia puede ser descrita, en primera instancia, mediante una función polinómica como:

$$T(\varepsilon') = \sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon'^i \quad \text{Ecuación 4.2.5}$$

Donde t_i son los coeficientes de un polinomio de grado n que depende del ángulo de elevación en el espacio imagen. Como se ha comentado anteriormente, la expresión es totalmente equivalente si en lugar del ángulo de elevación imagen se emplea el ángulo de elevación en el espacio objeto.

- Distancia focal

La distancia focal se define paraxialmente como la distancia existente entre el plano principal imagen y el plano donde se forma la imagen de un objeto situado en eje y en el infinito con respecto al sistema óptico. Dado que es un parámetro paraxial, a priori no presenta una variación en función del ángulo de elevación. Sin embargo, los sistemas tipo gran angular se encuentran muy alejados de los límites de la óptica paraxial. Si se emplea la definición de la apertura de un sistema óptico, entonces se puede expresar la dependencia angular de la distancia focal como:

$$f\# = \frac{f'}{\varnothing_{P.E}} \Rightarrow f'(\varepsilon') = f\#(\varepsilon') \cdot \varnothing_{P.E}(\varepsilon') \quad \text{Ecuación 4.2.6}$$

Donde el término $\varnothing_{P.E}(\varepsilon')$ expresa la variación del diámetro de la pupila de entrada para cada ángulo del campo de visión del sistema óptico gran angular. [Fallah 1996]

- Inclinación y tamaño de pupila.

Las pupilas de entrada y salida son los lugares geométricos, en los espacios objetos e imagen respectivamente, a través de los cuales la luz entra y sale del sistema óptico. Estos elementos son descritos mediante la óptica paraxial como las imágenes del diafragma de apertura a través del sistema óptico en el espacio objeto e imagen respectivamente. Cuando el sistema óptico no presenta grandes aberraciones, la imagen del diafragma de apertura se sitúa en un plano determinado (plano de pupila), y el tamaño de éstas es el esperado según la óptica paraxial.

Cuando los sistemas ópticos se alejan de esta situación ideal, como es el caso de los diseños gran angular, la posición de las imágenes del diafragma de apertura varía para cada posición del campo, ocurriendo lo mismo con su inclinación. En efecto, las pupilas se encuentran tanto

más giradas cuanto mayor es el ángulo de campo analizado (figura 4.2.9). Además, el aumento pupilar no es constante a lo largo del campo. [Laikin 2001a] Por tanto, el término que hace referencia a la superficie de la pupila de entrada del sistema debe ser desglosado en los siguientes términos:

$$S_{PE}(\varepsilon') = \pi \cdot \frac{\varnothing_{P.E}^2(\varepsilon')}{4} \quad \text{Ecuación 4.2.7}$$

El tamaño y por tanto, el diámetro de la pupila varía con respecto a su valor paraxial en cada posición del campo de visión, es decir, para cada ángulo de elevación. La función que describe este parámetro es desconocida a priori.

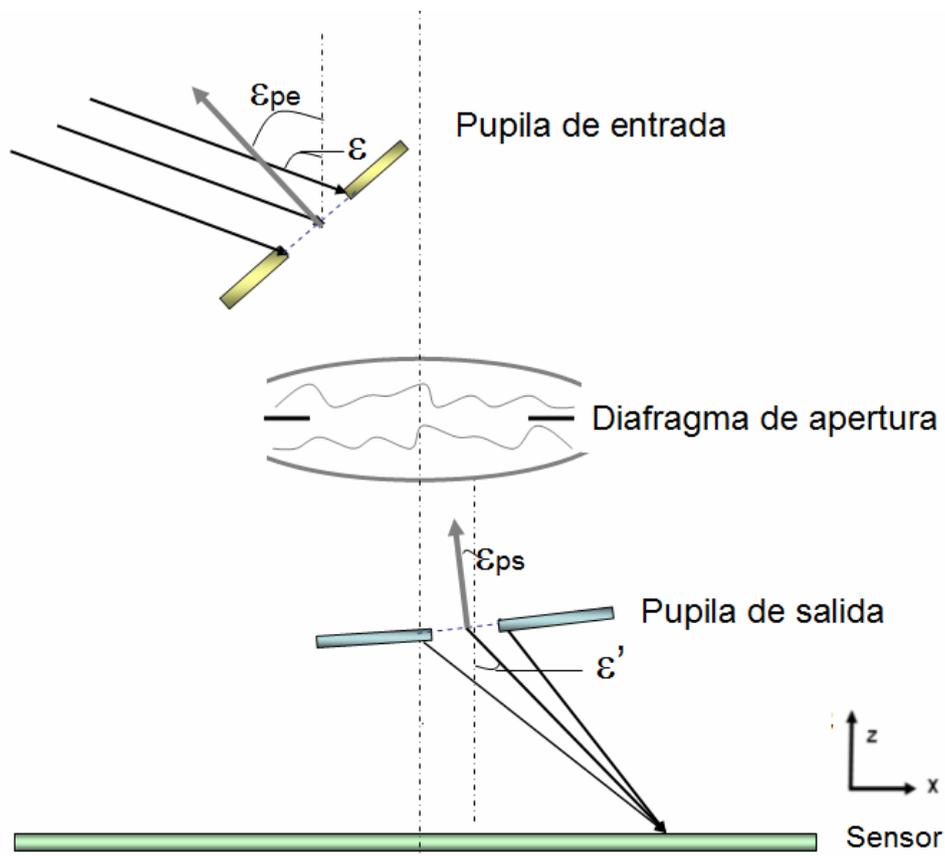


Figura 4.2.9 Esquema de la disposición típica de pupilas de entrada y salida en un sistema óptico gran angular. Tanto la pupila de entrada como la de salida presentan un desplazamiento y giro con respecto al eje óptico del sistema representado por la línea de puntos y rayas central. El haz luminoso que entra en el sistema a través de la pupila de entrada con ángulo de elevación ε emerge de la pupila de salida con un ángulo ε' . Las pupilas de entrada y salida se encuentran giradas según los ángulos ε_{pe} y ε_{ps} . Gracias a esta inclinación, permiten formar imágenes con una mayor cantidad de flujo luminoso.

- Término $\cos^4(\theta)$

El término que varía como la cuarta potencia del coseno debe ser reescrito para sistemas ópticos gran angular. El producto de los cuatro factores coseno debe ser desglosado en dos términos como se escribe a continuación: [Palmer 2009]

$$E_{\text{píxel}(i,j)} = E|_{\varepsilon=0} \cos^4(\varepsilon')$$

⇓

Ecuación. 4.2.8

$$E_{\text{píxel}(i,j)} = E|_{\varepsilon=0} \cos^3(\varepsilon') \cos(\varepsilon' - \varepsilon_{PS})$$

El primero de los dos nuevos factores hace referencia a la geometría ya estudiada en el apartado 4.1.1, es decir, el factor cúbico hace referencia al ángulo subtendido desde la imagen a la pupila de salida multiplicado por el factor de la distancia que aumenta como una potencia al cuadrado.

Por otro lado, la posición del centro de la pupila de salida cambiará para cada posición del campo presentando una inclinación diferente en cada caso, este efecto debe ser tenido en cuenta cómo se puede ver en el segundo factor donde aparece la diferencia entre los ángulos de elevación y el ángulo de giro de la pupila de salida (Fig. 4.2.9).

Teniendo en cuenta el estudio de todos los términos que conforman la ecuación 4.2.2, se puede escribir:

$$E_{\text{píxel}(i,j)} = L \frac{\left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon'^i \right) \left(\pi \frac{\varnothing_{P.E}^2(\varepsilon')}{4} \right) \beta_P^2(\varepsilon) \cos^3(\varepsilon') \cos(\varepsilon' - \varepsilon_{PS})}{f'^2(\varepsilon')} \quad \text{Ecuación 4.2.9}$$

Dado que el denominador de 4.2.9 representa la distancia focal del sistema, este término puede ser escrito en función de la apertura del sistema óptico haciendo uso de la definición de dicho parámetro:

$$f \# = \frac{f'}{\varnothing_{P.E}} \quad \text{Ecuación 4.2.10}$$

Donde el numerador es la focal descrita anteriormente y el denominador hace referencia al diámetro de la pupila de entrada. Si la focal se despeja y se sustituye en 4.2.9, se obtiene:

$$E_{\text{pixel}(i,j)} = L' \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \left(\pi \frac{\varnothing^2_{PE}(\varepsilon')}{4} \right) \beta_P^2(\varepsilon') \frac{\cos(\varepsilon' - \varepsilon_{PS}) \cos^3(\varepsilon')}{f\#^2(\varepsilon') \cdot \varnothing^2_{P.E}(\varepsilon')} \quad \text{Ecuación 4.2.11}$$

Simplificando se tiene:

$$E_{\text{pixel}(i,j)} = \frac{\pi L'}{4} \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \beta_P^2(\varepsilon') \frac{\cos(\varepsilon' - \varepsilon_{PS}) \cos^3(\varepsilon')}{f\#^2(\varepsilon')} \quad \text{Ecuación 4.2.12}$$

Como se ha comentado anteriormente (ecuación 4.1.4), el ángulo de elevación en el espacio de imagen es una función del ángulo de elevación en el espacio objeto. Ambos ángulos están relacionados entre sí ya que son conjugados a través del sistema óptico. Admitiendo tal dependencia se puede admitir que la iluminación es, en última instancia, una función del ángulo de elevación en el espacio objeto. Si el razonamiento se efectúa en términos del espacio objeto, entonces se tiene:

$$\begin{aligned} \varepsilon' = \varepsilon'(\varepsilon) &\rightarrow E(\varepsilon'(\varepsilon)) \Rightarrow E(\varepsilon) \\ \varepsilon_{PS} = \varepsilon_{PS}(\varepsilon_{PE}) &\rightarrow \cos(\varepsilon' - \varepsilon_{PS}) \Rightarrow \cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.2.14}$$

Si además, la luminancia no es uniforme, entonces, la ecuación correspondiente a la iluminación de un píxel en función de los parámetros del espacio objeto del sistema óptico se escribirá como:

$$E_{\text{pixel}(i,j)} = \frac{\pi L(\alpha, \varepsilon)}{4} \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \cos^3(\varepsilon)}{f\#^2(\varepsilon)} \quad \text{Ecuación 4.2.15}$$

La ecuación 4.2.15 es la iluminación sobre el plano focal imagen de un sistema óptico y que es denominada aquí como ecuación angular de correspondencia energética. Una expresión similar puede ser consultada en [Bass 1995].

La ecuación 4.2.15 es una expresión general que varía en función del ángulo de elevación. Los parámetros de los que depende son también funciones del mismo ángulo como la transmitancia, la apertura del sistema, la inclinación de la pupila de entrada y la luminancia. La ecuación angular de correspondencia energética queda dividida en tres partes escritas de forma compacta en la ecuación 4.2.16:

$$i) \frac{\pi L(\varepsilon, \alpha)}{4} \rightarrow \text{Término asociado al espacio objeto}$$

$$ii) \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \rightarrow \text{Término asociado a la pérdida de energía a través del sistema}$$

Ecuación
óptico 4.2.16

$$iii) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \cos^3(\varepsilon)}{f\#^2(\varepsilon)} \rightarrow \text{Término asociado a la geometría de los}$$

parámetros que definen el sistema óptico.

i) La primera es el factor de la luminancia multiplicada por un factor constante. Este primer factor está referido a la propia naturaleza del entorno de medida.

ii) El segundo factor determina la transmitancia del sistema óptico. Es decir, qué cantidad de energía del entorno de medida pasa finalmente al espacio imagen para incidir en el plano del sensor.

iii) Finalmente, el tercer factor es un conjunto de parámetros que corresponden al propio comportamiento del diseño del sistema óptico. Los parámetros de este tercer factor solo estarán disponibles si el usuario es el propio diseñador del sistema óptico, una casuística que en la mayoría de los casos es bastante improbable.

Dado que la información acerca del segundo y el tercer término en los que queda desglosada la ecuación angular de correspondencia energética no es accesible, se hace totalmente necesaria la realización de pruebas experimentales que permitan obtener el comportamiento radiométrico y geométrico en todo el campo de visión del sistema óptico gran angular.

A partir de los resultados experimentales caracterizaremos el sistema óptico. La descripción de las pruebas experimentales y las estrategias desarrolladas para valorar estos parámetros son objeto del capítulo 5.

4.2.3. Cómputo de la energía total y correlación con la medida discreta angular.

La ecuación 4.2.16 establece la iluminación en cada uno de los píxeles del sensor, donde cada píxel representa la mínima superficie capaz de registrar una cierta cantidad de iluminación procedente de una determinada dirección. La medida total de la iluminación proporcionada por el luxómetro puede relacionarse con la suma de todos los niveles de gris obtenidos para cada dirección angular registrada por el luxómetro en cada punto de medida del plano de nodos (x_r, y_r) .

En cada punto (x_r, y_r) se tiene un valor de iluminación y un registro angular de la procedencia de los haces de luz en cada dirección de la semiesfera. El plano de registros define una cuadrícula imaginaria donde en el centro de cada una de las celdas se encuentra el dispositivo de medida y donde se obtienen, por tanto, la cantidad total de la iluminación en ese punto y su distribución geométrica.

La iluminación se puede representar como una distribución continua sobre una superficie. Se asume que, por continuidad, en el plano de registro situado a una distancia d del suelo y segmentado en una cuadrícula de celda unidad S , la iluminación será constante en cada una de estas celdas (Fig. 4.2.10).

Para que la aproximación de continuidad sea válida, se ha de cumplir que la variación de los valores de iluminación dentro de cada cuadrícula no excedan, en valor absoluto, de los límites del error asociado al instrumento.

Si en cada celda unidad del plano de registros la iluminación es supuesta constante, se puede obtener fácilmente la cantidad de flujo luminoso medido en cada punto sin más que:

$$\phi = E(x_r, y_r) \cdot S \qquad \text{Ecuación 4.2.17}$$

Es decir, el producto de la iluminación medida en el plano de registros por la superficie de las celdas unidad da como resultado el flujo medido por el dispositivo para cada punto (x_r, y_r) .

Como se ha dicho al principio, la medida total de la iluminación proporcionada por el luxómetro puede relacionarse con la suma de todos los niveles de gris obtenidos para cada dirección angular registrada en el plano focal del sistema óptico. La equivalencia entre el valor del flujo calculado y los valores de gris digitalizados en el sensor puede escribirse como:

$$\phi = k \sum_{n=1}^p g_i \quad \text{Ecuación 4.2.18}$$

Donde g_i representa el nivel de gris de cada píxel, k es una constante y p es el número total de píxeles que se encuentran en el registro de la distribución geométrica de la iluminación.

En cada píxel de posición (i, j) en el registro se tiene una lectura de la iluminación vinculada una dirección angular del espacio.

Como ya se introdujo en la ecuación 4.1.11, es posible conocer la cantidad porcentual de iluminación relativa al total que incide para cada dirección a través de la siguiente expresión.

$$\phi_{\%} = \frac{\phi_{\text{píxel}_k}}{\phi_{\text{total}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.2.19}$$

Y de una manera más explícita:

$$\phi_{\%} = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^l \left(\sum_{i=1}^k g_{ij} \right)}{\sum_{n=1}^p g_n} \quad \text{Ecuación 4.2.20}$$

Donde el denominador expresa la suma total de los niveles de gris obtenidos en el registro fotométrico (círculo gris figura 4.2.11) mientras que el numerador es la suma de los

niveles de gris para un conjunto de l filas y k columnas de píxeles del registro (rectángulo blanco figura 4.2.11).

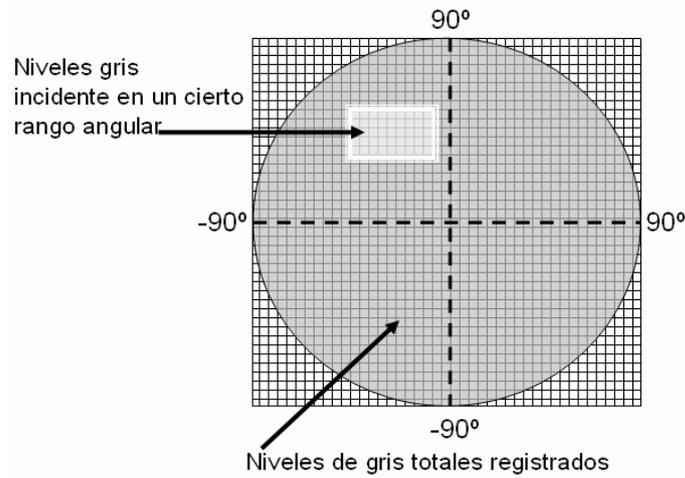


Fig 4.2.10 Esquema donde se muestran gráficamente los términos numerador y denominador de la ecuación 4.2.19. La zona que se encuentra dentro del círculo gris hace referencia a todos los píxeles del registro fotométrico, es decir, al denominador de la expresión anterior. Por otro lado, la zona enmarcada dentro del rectángulo blanco representa un conjunto de píxeles como indica el numerador de 4.2.19 cuya suma de niveles de gris será un porcentaje determinado relativo al total registrado.

Haciendo uso de los términos i) y ii) de la ecuación angular de correspondencia energética, y asumiendo luminancia uniforme, se puede escribir que para cada punto (x_r, y_r) , el flujo luminoso procedente de cada dirección del espacio se obtiene como:

$$\phi(x_r, y_r) = \frac{\pi L S_{\text{pixel}}}{4} \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \cos^3(\varepsilon)}{f \#^2(\varepsilon)} \phi(0,0) \quad \text{Ecuación 4.2.21}$$

Donde $\phi(0,0)$ es el flujo de entrada en la dirección paralela al eje óptico del sistema y los otros factores son los términos de la ecuación angular de correspondencia multiplicados por la superficie del píxel que actúa como una constante. La ecuación 4.2.21 puede ser escrita de forma más compacta como:

$$\phi(\varepsilon, \alpha) = \Phi(\varepsilon) \phi(0,0) \quad \text{Ecuación 4.2.22}$$

Donde la función $\Phi(\varepsilon)$ representa una función de transferencia del sistema óptico. Una vez parametrizada de forma experimental como se ha comentado anteriormente, la

función de transferencia del sistema óptico determinará qué cantidad de flujo luminoso incide en cada píxel. Dicha cantidad será correlacionada con el nivel de gris y una vez conocido el área de cada píxel, se podrá obtener la iluminación en todos los puntos del plano del sensor.

4.3 Rango dinámico

Durante todo este capítulo, y sin pérdida de generalidad en los razonamientos, todos los cálculos, deducciones y representaciones contemplados en las secciones precedentes, no ha sido tenido en cuenta el rango dinámico asociado tanto al luxómetro como a la cámara. Sin embargo, una vez obtenidas las expresiones generales del comportamiento de los dispositivos involucrados en la estrategia de medida, se hace necesario establecer los límites de medida y por tanto el rango dinámico asociado a ella.

4.3.1. Rango de valores de la medida de la iluminación

Una de las características que posee cualquier dispositivo electrónico es el rango dinámico. El rango dinámico es uno de los aspectos fundamentales que deben ser tenidos en cuenta para la realización de una correcta medida.

Establecidas las ecuaciones que describen la iluminación y el flujo luminoso incidente para cada dirección y longitud de onda en el plano de registro del sistema óptico, se abordará en este apartado una nueva restricción de la medida que implica el rango dinámico del luxómetro y la cámara.

El rango dinámico de los dispositivos digitales está relacionado con la capacidad de carga eléctrica que son capaces de almacenar los sensores al detectar los fotones incidentes sobre ellos. El rango dinámico de un detector es la razón entre el mayor y el menor valor que es capaz de medir.

Dado que el equipo de medida implica el uso de dos dispositivos digitales diferentes, a saber, un luxómetro y una cámara, se ha de diferenciar qué valores máximos y mínimos miden cada uno de los dos dispositivos y cómo se relacionan entre sí.

Rango dinámico del luxómetro

En el caso del luxómetro, el rango de valores de iluminación que permite medir este tipo de dispositivos es muy amplio, la figura 4.3.9 muestra un gráfico donde se puede ver el rango de medida de iluminación para dos casos particulares de luxómetros, uno de uso industrial y otro portátil.

El luxómetro industrial puede llegar a medir 10^5 lux mientras, que los luxómetros portátiles reducen a la mitad su capacidad de medida en valores máximos. Por lo que respecta a los valores mínimos, los luxómetros industriales como el referenciado en la gráfica pueden llegar a medir 10^{-5} lux mientras que los luxómetros portátiles es de 1 lux. No obstante, el rango de iluminación que se contempla en medidas de alumbrado público (en rojo) se encuentra entre los 0 y 2000 lux, de forma, que los luxómetros comerciales son aptos para la realización correcta de la medida.

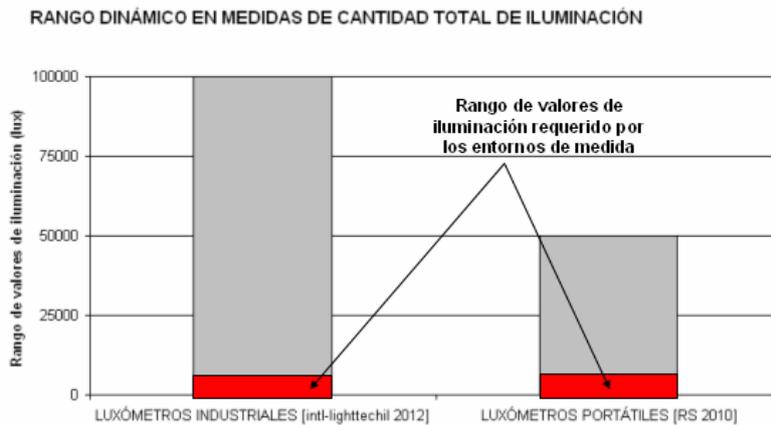


Fig 4.3.1. Comparativa del rango de medida de valores de iluminación de luxómetros de mayor calidad (uso en laboratorio industria) y luxómetros de menor calidad (dispositivos portátiles). El rango dinámico exigido para la correcta realización de la medida está situado dentro de los límites de funcionamiento de los luxómetros. [IL 2012, RS 2010]

La ganancia es el factor a tener en cuenta para poder llegar a medir valores elevados de iluminación. La ganancia de un luxómetro es la característica electrónica que permite al detector proporcionar una señal de salida adecuada sin llegar a la saturación provocada por una señal de entrada muy intensa. Los dispositivos industriales presentan un sistema de autogancia que permiten trabajar en cualquier rango de medida para el que han sido diseñados de forma automática, es decir (10^{-5} - 10^5 lux). En cambio, en los luxómetros

portátiles, es necesario cambiar manualmente la ganancia mediante un selector de rango de medida, en general, existen tres zonas de rangos, bajos niveles de iluminación (0-200 lux), niveles medios (200-2000 lux) y altos niveles de iluminación (2000-50000 lux).

Para la detección de los valores mínimos, el ruido de los detectores es una característica clave. Un tipo de ruido de un luxómetro es la respuesta que genera por sí mismo sin ninguna señal de entrada, es decir, sin que la luz incida sobre él. Este tipo de ruido es conocido en la literatura anglosajona como dark current noise. A menor ruido, mayor capacidad de medir valores más bajos de iluminación. El ruido generado por un luxómetro industrial como el referenciado en la figura es de 10^{-10} lux mientras que en un luxómetro portátil es de 10^{-1} lux. [Hamamatsu 2012]

Se puede por tanto concluir que el rango dinámico de luxómetros industriales y portátiles estará alrededor de los valores:

Luxómetro	Valor máx. detectable (lux)	Valor mín. detectable (lux)	Rango dinámico
Industrial	100000	0.00001	$10^{11}:1$
Portátil	50000	0.1	$5 \times 10^6:1$

Tabla 4.3.1

Rango dinámico de la cámara

En el caso de la cámara, el rango dinámico queda definido, como se ha escrito anteriormente, por la razón entre los valores de mayor y menor intensidad de luz registrable. Es decir, los valores de grises máximos y mínimos registrados por los píxeles. En cada registro del sensor, los píxeles actúan como cavidades individuales que almacenan una cantidad de fotones incidentes sobre ellos, dicha cantidad es entonces clasificada con un nivel de gris relativo a todos los píxeles del sensor. Cada píxel puede ser entendido como un fotómetro en miniatura capaz de contener, en función de su tamaño, una mayor o menor cantidad de luz que posteriormente será convertida en una señal eléctrica. [Cambridge 2012]

El tamaño de los píxeles de un sensor es el factor que determina el rango dinámico de una cámara digital. En general a mayor tamaño, mayor rango dinámico, esto es lo que ocurre

en las cámaras digitales tipo réflex, ya que emplean sensores con un tamaño de píxel mayor que las cámaras compactas.

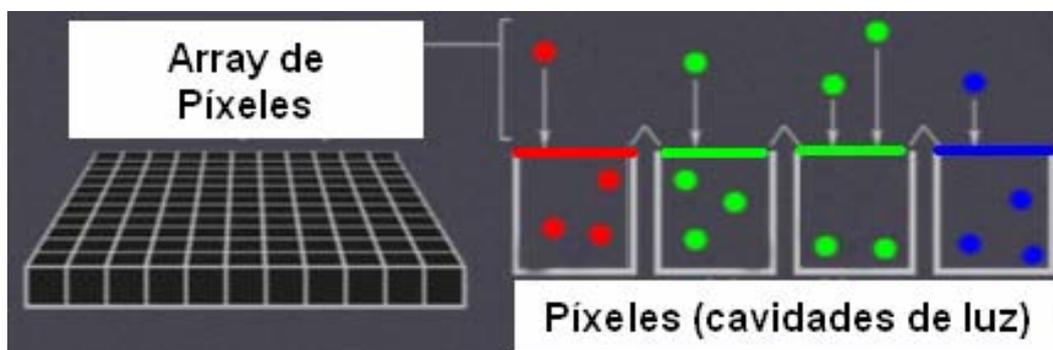


Fig 4.3.2. Dibujo de cómo los píxeles actúan como pequeñas cavidades que almacenan los fotones que inciden sobre ellos. En el dibujo se expresan en color verde, rojo y azul a los tres canales que configuran el patrón de Bayer y que permitirá filtrar el espectro de luz incidente en cada una de las cavidades del array de píxeles. El hecho de usar el doble de píxeles con filtro verde que rojos y azules se debe a que el canal verde produce menos ruido que los anteriores, pudiendo tener una mejor calidad final de imagen. Los píxeles son como pequeñas cavidades que almacenan fotones filtrados por cada uno de los filtros colocados sobre ellos para obtener la información colorimétrica completa del entorno. [Cambridge 2012]

Los valores mínimos capaces de ser detectados dependen, al igual que en los luxómetros, del ruido electrónico. Las cámaras presentan tres tipos de ruido muy comunes, ruido patrón, ruido aleatorio y ruido en bandas (Fig 4.3.3). [Cambridge 2012]

El ruido patrón es una señal que se produce cuando el tiempo de exposición es elevado. Cuando esto ocurre, aparecen los denominados hotpíxeles que son píxeles, que han sobrepasado su nivel de almacenamiento de cantidad de energía. El patrón de este ruido presentará siempre la misma distribución.

El ruido aleatorio se encuentra en tiempos cortos de exposición y se debe a la propia fluctuación de cantidad de energía que incide sobre los píxeles. Éste es un ruido intrínseco de los sistemas electrónicos y su distribución cambia continuamente.

El ruido en bandas se produce generalmente cuando la cámara lee los datos del sensor. Es un ruido que depende fundamentalmente de cada modelo de cámara y su aparición es mayor en zonas de brillo elevado y zonas que presentan una gran oscuridad.

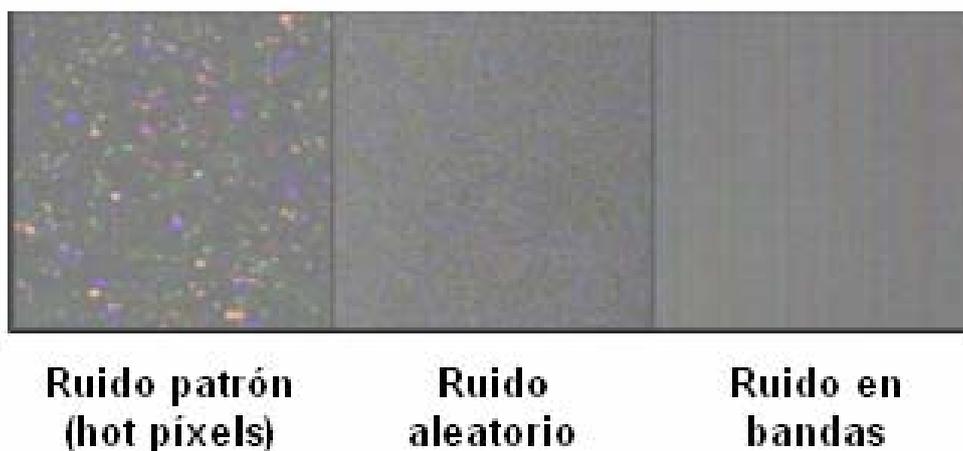


Fig. 4.3.3 Tipos de ruido asociados a sensores empleados en cámaras digitales. Cada uno de los tipos de ruido depende de una situación distinta en la que se realiza el trabajo. La naturaleza de cada uno también es distinta pero todos ellos influyen de forma activa en la determinación del rango dinámico. [Cambridge 2012]

Los valores mínimos y máximos que pueden registrar los píxeles dependen de su arquitectura electrónica. Valores de entre 1lux y 200lux son los límites que deberán ser registrados en los entornos de medida.

4.4 Generación de nodos de medida

Una vez establecida la ecuación que expresa la cantidad de flujo e iluminación de la distribución geométrica en los puntos de registro (nodos), es necesario analizar la relación que debe establecerse entre los nodos de medida.

Esta sección se estructura en dos puntos principales; el primero de ellos introduce los conceptos de nodo y medida cooperativa. El segundo expone los métodos de interpolación de la información de las medidas fotométricas.

4.4.1.- Medidas cooperativas.

En el punto 4.3.1, se ha visto que en cada punto de registro (nodo) se tiene la iluminación que llega a dicho nodo y su distribución angular en toda una semiesfera centrada en el propio nodo. Debido al uso del sistema óptico gran angular, cada punto de registro contiene información fotométrica del entorno de medida aunque al tratarse de una medida

local, por sí sola, no proporciona la información completa acerca del mapa de iluminación del entorno.

Para hallar la información completa acerca del mapa de iluminación del entorno es necesario recurrir a la cooperación entre las medidas realizadas en cada uno de los nodos, con el mínimo número de nodos posibles que garanticen la información fotométrica necesaria para generar el mapa de iluminación del entorno de medida.

Así, surge el concepto de medidas cooperativas. Por medidas cooperativas se entiende un conjunto nodos que proporciona por sí solo la información necesaria para generar un mapa de iluminación de un determinado entorno de medida.

El conjunto de nodos empleados depende de los diferentes parámetros del entorno de medida tales como dimensiones del entorno, geometría del mismo o altura de la medida.

Como se ha impuesto en el apartado 4.2.3, la variación de los valores de iluminación dentro de cada cuadrícula no pueden exceder, en valor absoluto, de los límites del error asociado al instrumento.

Matemáticamente, podemos establecer la condición de continuidad como:

$$\begin{aligned}
 E(x, y) \text{ continua} &\Leftrightarrow \forall E(x_i, y_i) \subset S \\
 &\downarrow \\
 E(x_i, y_i) &\in |E(x_r, y_r) \pm \Delta \varepsilon_{inst}|
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 4.4.1}$$

El plano de nodos es paralelo al plano donde se quiere hallar el mapa de iluminación. Los nodos se encontrarán a una cierta altura d sobre el plano donde se quiere hallar el mapa de iluminación, gracias a la distribución geométrica de la iluminación propagada sobre las celdas cuadradas (figura 4.1.20) del plano de medida, no será necesario imponer puntos de registro en posiciones intermedias a los nodos de medida, de esta forma, se optimiza el proceso de medida minimizando el número de puntos intermedios a medir.

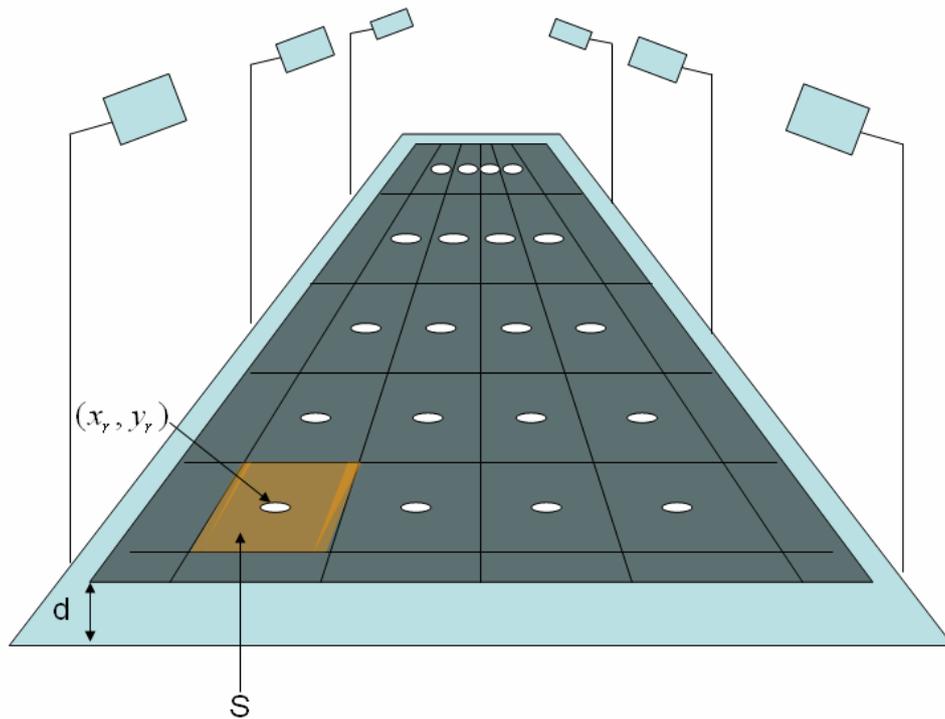


Fig 4.4.1 Esquema del plano de nodos (cuadrícula gris) sobre la superficie de una hipotética calle (superficie azul) iluminada artificialmente. El plano de nodos se sitúa a una altura d del plano de suelo de la calle y es segmentado en una cuadrícula donde cada celda unidad presenta un área S . Los puntos de medida están centrados en cada una de las celdas y es en estos puntos donde se realiza la medida de la cantidad de iluminación y la distribución geométrica de la misma. Se asume que la medida del luxómetro que proporciona la iluminación en cada punto se mantiene constante en cada celda de área S .

Los nodos de medida representan valores de registro que son realizados de forma asíncrona, es decir, la información obtenida por el dispositivo en cada punto de registro es realizada en instantes diferentes de tiempo. Dado que las instalaciones de alumbrado público presentan un régimen estable de emisión de flujo luminoso durante cada período de funcionamiento, es decir, cada noche, es admisible considerar que el valor de la medida en instantes de tiempo diferentes en este intervalo temporal de funcionamiento, no variará más allá del error experimental.

4.4.2.- Interpolación de la información generada en la medida.

La selección de nodos de medida impone un muestreo del espacio que contempla una serie de posiciones geométricas que deben ser interpoladas con el fin de inferir los resultados de la medida en aquellos puntos que no existen o no corresponden a la localización de los nodos de medida.

Según la norma, la interpolación es aplicada sobre la intensidad y a partir de dicha interpolación se calculan las magnitudes fotométricas restantes como la luminancia o la iluminación. Dado que la estrategia de medida contempla la obtención de la iluminación sin la necesidad de medir antes la intensidad, los parámetros cambiarán con respecto a la norma pero no así el procedimiento matemático. [UNE-EN 13201-2/3/4, UNE-EN 13032-1]

Se plantean en este apartado los métodos contemplados por la normativa, a saber, la interpolación lineal y la interpolación cuadrática.

La interpolación lineal es el procedimiento más simple. En el esquema de la figura 4.4.6 se presentan los parámetros necesarios para realizar la interpolación lineal de la iluminación en una posición genérica (x, y) .

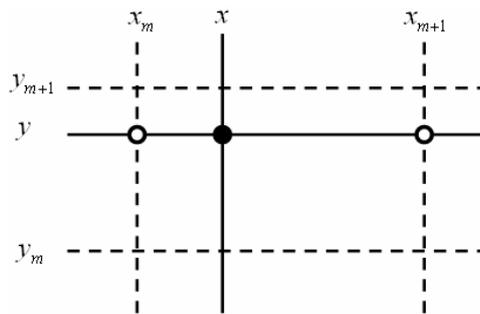


Fig. 4.4.6 Esquema de parámetros necesarios para la interpolación lineal de la iluminación. El punto (x,y) representa la localización donde se desea conocer el valor de la medida interpolado a partir de la información de los nodos medida. [UNE-EN 13201-2/3/4, UNE-EN 13032-1]

En la figura 4.4.6 la intersección de las líneas discontinuas representa las coordenadas de las posiciones de los nodos de medida más cercanos al punto donde se requiere conocer la medida interpolada. En este caso, cuatro parejas de coordenadas, (x_m, y_m) , (x_m, y_{m+1}) , (x_{m+1}, y_m) , (x_{m+1}, y_{m+1}) son necesarias para generar la información del valor interpolado de la iluminación. Con esta información se calculan dos constantes:

$$a) \quad K_1 = \frac{x_m - x}{x_m - x_{m+1}}$$

$$b) \quad K_2 = \frac{y_m - y}{y_m - y_{m+1}}$$

Ecuación 4.4.14

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores, es posible obtener los valores interpolados según el procedimiento de la interpolación lineal y calcular la iluminación a partir de la expresión:

$$E(x, y) = E(x, y_m) - K_2 [E(x, y_m) - E(x, y_{m+1})] \quad \text{Ecuación 4.4.15}$$

Donde

$$\begin{aligned} E(x, y_m) &= E(x_m, y_m) - K_1 [E(x_m, y_m) - E(x_{m+1}, y_m)] \\ E(x, y_{m+1}) &= E(x_m, y_{m+1}) - K_1 [E(x_m, y_{m+1}) - E(x_{m+1}, y_{m+1})] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.4.16}$$

En cuanto a la interpolación cuadrática, el razonamiento es análogo aunque en este caso y a diferencia de la interpolación lineal, se requieren tres puntos en cada uno de los ejes de coordenadas en lugar de dos. Y por tanto:

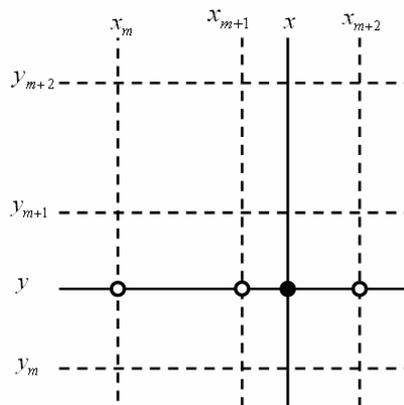


Fig. 4.4.7 Esquema de parámetros necesarios para la interpolación cuadrática de la iluminación. El punto (x,y) representa la localización donde se desea conocer el valor de la medida interpolado a partir de la información de los nodos medida. [UNE-EN 13201-2/3/4, UNE-EN 13032-1]

Al igual que en la ecuación 4.4.14, ahora se calculan de forma análoga tres constantes para cada dimensión a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{(x - x_{m+1})(x - x_{m+2})}{(x_m - x_{m+1})(x_m - x_{m+2})} \\
 K_2 &= \frac{(x - x_m)(x - x_{m+2})}{(x_{m+1} - x_m)(x_{m+1} - x_{m+2})} \\
 K_3 &= \frac{(x - x_m)(x - x_{m+1})}{(x_{m+2} - x_m)(x_m - x_{m+1})} \\
 q_1 &= \frac{(y - y_{m+1})(y - y_{m+2})}{(y_m - y_{m+1})(y_m - y_{m+2})} \\
 q_2 &= \frac{(y - y_m)(y - y_{m+2})}{(y_{m+1} - y_m)(y_{m+1} - y_{m+2})} \\
 q_3 &= \frac{(y - y_m)(y - y_{m+1})}{(y_{m+2} - y_m)(y_m - y_{m+1})}
 \end{aligned}$$

Ecuación 4.4.17

Haciendo uso de las ecuaciones 4.4.17, es posible obtener los valores interpolados según el procedimiento de la interpolación lineal y calcular la iluminación a partir de la expresión:

$$E(x, y) = q_1 E(x, y_m) + q_2 E(x, y_{m+1}) + q_3 E(x, y_{m+2})$$

Ecuación 4.4.18

donde

$$\begin{aligned}
 E(x, y_m) &= K_1 E(x_m, y_m) + K_2 E(x_{m+1}, y_m) + K_3 E(x_{m+2}, y_m) \\
 E(x, y_{m+1}) &= K_1 E(x_m, y_{m+1}) + K_2 E(x_{m+1}, y_{m+1}) + K_3 E(x_{m+2}, y_{m+1}) \\
 E(x, y_{m+2}) &= K_1 E(x_m, y_{m+2}) + K_2 E(x_{m+1}, y_{m+2}) + K_3 E(x_{m+2}, y_{m+2})
 \end{aligned}$$

Ecuación 4.4.19

4.5 Representaciones del registro seleccionadas.

Establecida la forma en la que se realiza la medida, cómo es tratada la información y estudiada la interpolación de la misma, en esta sección se evalúan las formas de representación de la información generada en los anteriores.

Este apartado está dividido en tres puntos principales, que atienden a las formas de representación de la información fotométrica y su relación entre ellas. En el primer punto se muestra la representación de los mapas de iluminación mediante curvas isolux y un filtro matemático que ayuda a optimizar su representación gráfica. En el segundo punto se muestra la representación de los registros angulares y finalmente en el último punto se muestra la relación entre ambos.

4.5.1.- Mapa de iluminación mediante curvas isolux.

Una vez realizadas las medidas es de gran utilidad proceder a su presentación en formatos más visuales que los datos en bruto (agrupaciones de posición y valor de la iluminación). Existen múltiples formas de representar gráficamente una matriz de datos. En el caso de las medidas de iluminación una de las representaciones más adecuada es identificar mediante una línea continua los valores de igual nivel de iluminación (curvas isolux).

La figura 4.5.1. muestra un ejemplo de mapa de iluminación mediante curvas isolux. Normalmente a las representaciones mediante curvas isolux se les añade color de forma que cada color representa el área encerrada entre dos curvas isolux. También es habitual encontrar mapas de iluminación con curvas isolux sin las superficies coloreadas. En este caso cada curva del mapa se encuentra acompañada de una etiqueta que indica el valor de lux que corresponde dicha curva. Como no siempre se dispone de un conjunto completo de valores que nos permita generar las curvas isolux en su completitud, se emplea la estrategia de interpolación de resultados explicada en el apartado anterior con el fin de generar los valores interpolados necesarios para su generación. La figura 4.5.1. representa el aspecto estándar de los mapas de iluminación con curvas isolux y coloreados

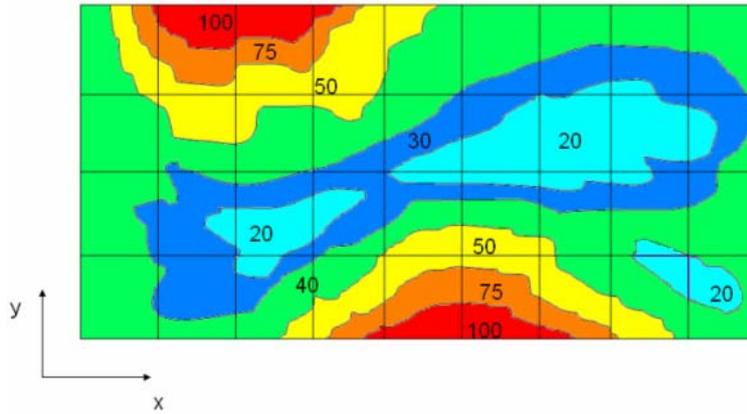


Fig. 4.5.1 Ejemplo de un mapa de iluminación con curvas isolux representado en color. Las etiquetas numéricas indican el valor de isolux de toda la curva que encierra las áreas de distintos colores.

Además de los mapas de iluminación, se emplean mapas angulares asociados a las medidas angulares realizadas en los nodos. Los mapas angulares aportan información adicional de gran utilidad para detectar la procedencia de incidencias detectadas en los mapas de iluminación como por ejemplo exceso o falta de iluminación en determinadas zonas.

Como se ha comentado al principio de este apartado, es importante poder representar los resultados de la medida fotométrica que permitan una interpretación ágil de los mismos. Con este objetivo se presenta un filtro matemático que a partir de los valores de la medida genera un gráfico de curvas de isolux suaves (Fig. 4.5.2). El filtro mejora la visualización de los resultados y se puede calcular empleando las siguientes expresiones

$$E^l_{i,j} = k_0 E_{0,0} \left/ \begin{array}{l} k_0 = \frac{9}{10} E_{0,0} \\ i = -1, 0, +1 \\ j = -1, 0, +1 \end{array} \right/ \quad i = j = 0 \Rightarrow k_0 = 1 \Rightarrow E^l_{i,j} = E_{0,0} \quad \text{Ecuación 4.5.1}$$

$$E_{i,j} = \frac{1}{8} \left[\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 E^l_{i,j} \right]$$

El filtro actúa en dos fases. Por un lado se asignan valores de interpolación preliminar $E^l_{i,j}$ a los puntos notados en rojo que se encuentran situados alrededor de cada uno de los puntos de referencia (rombo verde). Una vez asignados los valores de interpolación preliminar, se calcula, para cada punto, la media aritmética de los 8 puntos que rodean al valor de

referencia. La media aritmética es finalmente el valor de interpolación $E_{i,j}$ generado por el filtro.

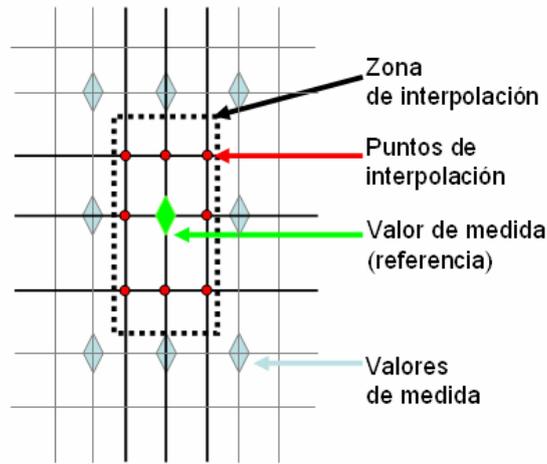


Fig. 4.5.2 Elementos necesarios del filtro para la mejora de la visualización de las medidas. El proceso de filtrado es efectuado de la misma forma para todos los valores de la medida que actuarán como valores centrales una vez en el proceso. De esta forma se asegura que todos los valores de medida (en azul) influyen en sus vecinos más cercanos proporcionando una visualización suave y continua de la iluminación.

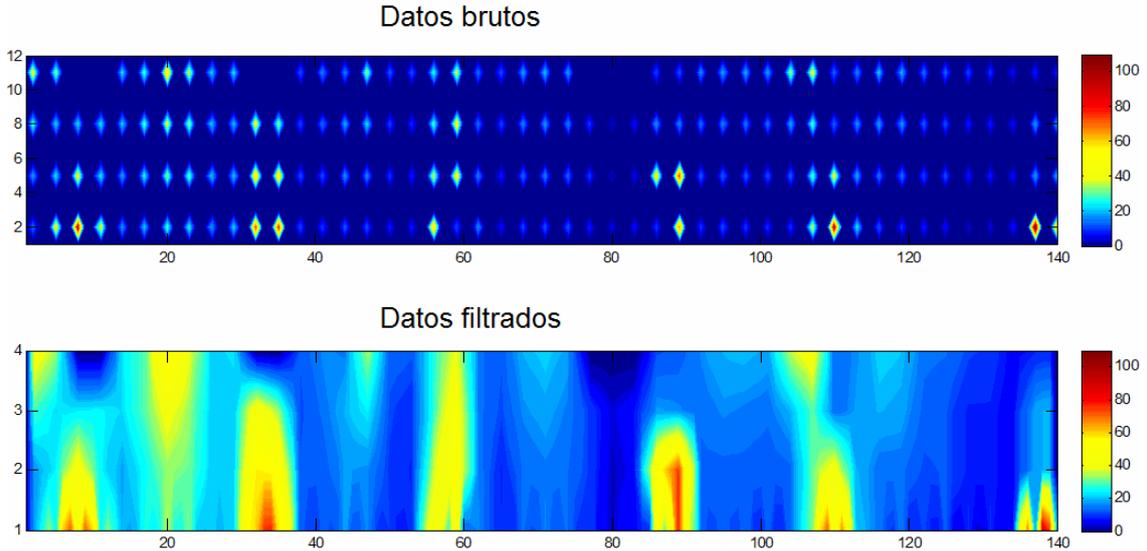


Fig 4.5.3 Representaciones de un conjunto de datos de iluminación medidos con un luxómetro. En la parte superior se muestran los resultados de los datos en bruto y en la parte inferior los mismos datos filtrados según la interpolación analizada anteriormente.

4.5.2.- Mapas de medidas angulares asociadas a los nodos.

En cada nodo de medida se tienen los datos de la cantidad total de iluminación y la distribución angular de la misma. Los mapas angulares muestran la procedencia angular de la luz en cualquier dirección del espacio referenciada a una semiesfera cuyo centro se sitúa en plano de la pupila de entrada del objetivo gran angular.

Para cada nodo de medida existe un mapa de representación angular. Los mapas angulares presentan cuatro cuadrantes cuyo centro corresponde al nodo de medida donde ha sido obtenido el registro correspondiente. Cada cuadrante proporciona información y orientación acerca de la procedencia de la cantidad y distribución de la luz que incide sobre el nodo de medida.

La procedencia geométrica de la luz corresponde a una representación angular en coordenadas polares, es decir, cada punto del gráfico viene descrito por dos parámetros angulares, a saber, el ángulo de elevación y el ángulo de acimut. El tipo de representación es un mapa circular equivalente a una proyección de la semiesfera vista por el sistema óptico sobre el plano focal del mismo (plano del sensor de la cámara).

Los ejes principales que definen el círculo en el que queda englobado el registro (Fig. 4.5.4) representan los valores del ángulo de elevación en cada uno de los cuatro cuadrantes, mientras que el ángulo de acimut viene dado a partir de la relación entre las coordenadas en los ejes de elevación del punto del mapa a analizar.

Estos mapas complementan la información expuesta por los mapas de iluminación vistos en el apartado anterior. La figura 4.5.3 muestra un ejemplo de cómo los mapas angulares permiten conocer la procedencia de la luz en un determinado entorno de medida. La parte izquierda de la representación polar del nodo de medida resaltado en el dibujo inferior de la figura 4.5.4, muestra un aumento de los niveles de gris que se corresponde con la localización de las fuentes de luz que aparecen en el dibujo superior.

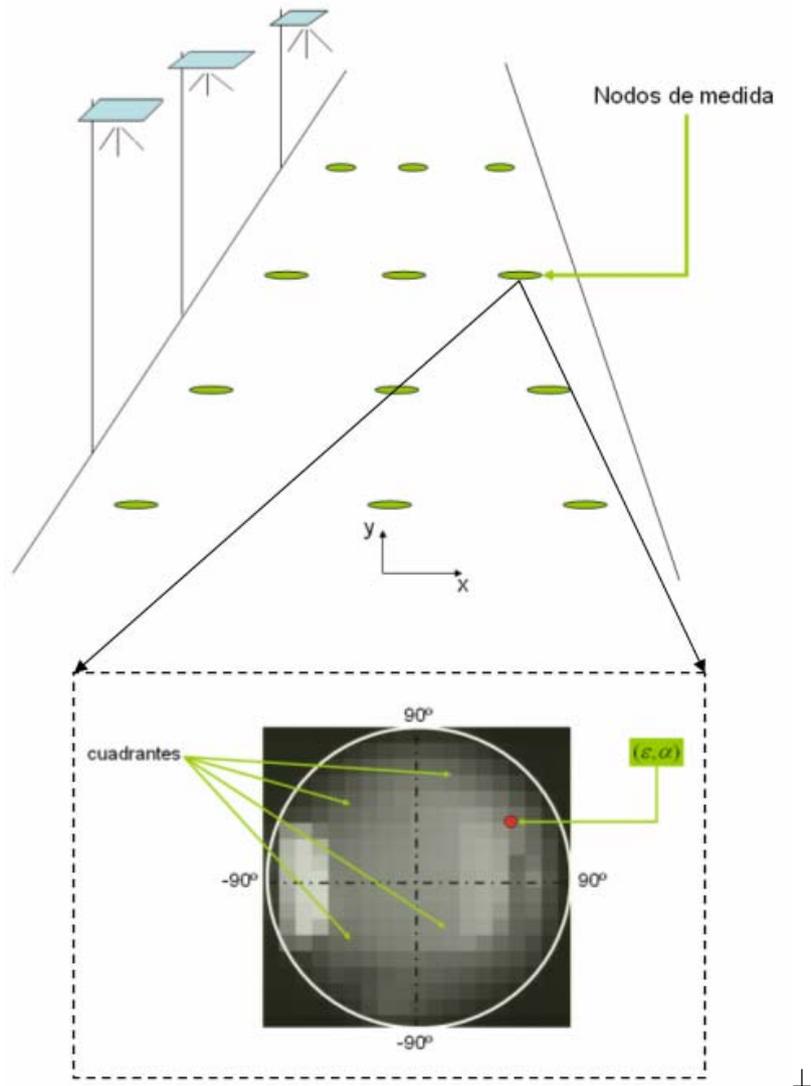


Fig 4.5.4 Esquema de un mapa de representación polar y su aporte al análisis de la información de los mapas isolux en un entorno de medida como una calzada con varias luminarias. Los mapas de representación angular detectan las incidencias existentes en la distribución de luz en cada punto, y por extensión en todo el plano de medida, aportando información exacta de la localización de la incidencia detectada, así como de su origen y naturaleza al mapa de isolux. Incidencias tales como la detección de ausencia o exceso de luz debida a obstáculos naturales o fallo de la instalación respectivamente, o el análisis de la distribución y cantidad de luz emitida por otras fuentes externas a la instalación de alumbrado que se pretende medir son algunas entre las variadas casuísticas que permiten analizar los mapas de representación en coordenadas polares, trabajando en conjunto con los mapas isolux.

Capítulo 5

Caracterización del instrumental empleado

Una vez expuesta la estrategia de medida en el capítulo anterior, es necesario caracterizar los dispositivos empleados en el desarrollo del algoritmo. Experimentalmente se asegurarán los rangos de viabilidad y funcionamiento para que cada componente trabaje de manera apropiada. Este conjunto de operaciones tiene por objetivo la correcta aplicación de la estrategia de medida estudiada y analizada.

Este capítulo queda dividido en cuatro partes principales. En las tres primeras se mostrará el estudio sobre la caracterización del hardware empleado, es decir, el luxómetro, el objetivo gran angular y la cámara CMOS. En la cuarta parte, se explicará el algoritmo desarrollado a partir de la información obtenida en la caracterización. Los parámetros que van a ser analizados en cada uno de los dispositivos son:

Luxómetro	Objetivo	Cámara
Respuesta direccional	Enfoque	Linealidad
Linealidad	Transmitancia	Respuesta espectral
Respuesta espectral	Distorsión	Ruido
Dependencia con la temperatura		
Fatiga		
Cambio de intervalo		

5.1 Luxómetro

La estrategia de medida explicada en el capítulo 4 requiere dos parámetros en cada punto de medida: la cantidad total de iluminación y la distribución geométrica de la misma. El luxómetro es el dispositivo empleado para realizar la medida de la iluminación.

El luxómetro empleado en la tesis y que hemos caracterizado es el Light Meter modelo V10860, comercializado y distribuido por la compañía RS [RS 2010]. Es un luxómetro portátil digital con interfaz de datos de salida tipo RS-232. Presenta cuatro modos de medida en función de las fuentes a medir (Wolframio, fluorescente, luz de día o mercurio). La velocidad de medida es de 2 muestras por segundo. Los valores que permite medir se sitúan entre 0 y 50000 Lux en tres rangos de medida, a saber, en (0-2000) Lux, (2000-20000) Lux y (20000-50000) Lux con un error de $\pm 8\%$ en cada uno de ellos.

Para medir correctamente la iluminación se han de tener en cuenta los aspectos técnicos resaltados en el capítulo 3 del estado del arte, concretamente en el punto 3.3. [UNE-EN 13032-1]



Fig. 5.1.1 Luxómetro empleado en las medidas experimentales. [RS 2010]

5.1.1. Respuesta direccional

En el capítulo del estado del arte se definió el parámetro empleado para caracterizar la respuesta direccional de un luxómetro: [UNE-EN 13032-1]

$$f_2 = \frac{Y(\varepsilon, \varphi)}{Y(0, \varphi) \times \cos \varepsilon} - 1 \quad \text{Ecuación 5.1.1}$$

Donde:

$Y(\varepsilon, \varphi) \equiv E$ es la señal de salida en función de la dirección de incidencia de la luz, es decir, la iluminación medida con el luxómetro.

ε es el ángulo medido con relación a la normal al plano de medida, ángulo de elevación.

φ es el ángulo azimutal.

El parámetro de respuesta direccional no suele estar indicado en las especificaciones de la mayoría de luxómetros de estas características [Aemc 2012, Twilight 2012].

Para obtener la respuesta direccional del luxómetro se ha empleado una fuente láser (puntero) [Edmund 2012b] cuya emisión de flujo luminoso corresponde a un valor de 5 mW (valor máximo) de potencia de salida a 640nm de longitud de onda pico. El diámetro de salida del puntero láser es de 0.5 pulgadas.

El cabezal del luxómetro se ha situado a 400 mm de la fuente láser sobre un punto que pivota alrededor del eje z (ver figura 5.1.2). De esta forma se consigue posicionar el cabezal del luxómetro en posiciones angulares determinadas para analizar la respuesta dada por el propio cabezal para cada configuración geométrica. En la figura se puede ver también un rectángulo verde que simboliza la estructura mecánica que mantiene solidario el láser al punto de pivotaje sobre el que rota el cabezal del luxómetro.

La medida se ha realizado entre 0° y 90° con pasos angulares de 10° entre cada una de las medidas. La determinación de la posición angular se llevó a cabo empleando un dispositivo tipo transportador de ángulos con una resolución de 1° . La medida fue realizada en cada uno de los cuatro cuadrantes del plano x-z.

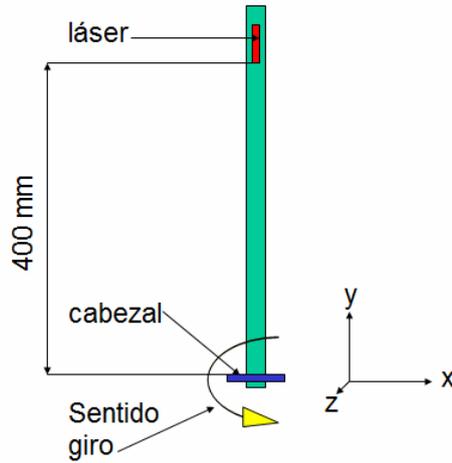


Fig. 5.1.2 Esquema de la disposición geométrica del montaje experimental para la caracterización de la respuesta direccional del luxómetro.

En la tabla 5.1.1 se muestran los resultados obtenidos de la medida experimental. La primera columna hace referencia al ángulo de elevación, la segunda representa el valor promedio de las cuatro medidas de la iluminación realizadas, la tercera es el valor relativo y normalizado en % respecto al máximo medido y finalmente la cuarta muestra los valores de la curva teórica, también en % de una función coseno.

Ángulo elevación ε ($^{\circ}$) $\pm 1^{\circ}$	Iluminación promedio E (lux) $\pm 8\%$	Iluminación promedio relativa E_r (%) $\pm 8\%$	Respuesta teórica coseno $\cos(\varepsilon)$ (%)
0	6250	100	100
10	5960	95	98
20	5490	88	94
30	4930	79	87
40	4850	78	77
50	4380	70	64
60	4000	64	50
70	3400	54	34
80	2160	35	17
90	1	0.02	0

Tabla 5.1.1

A partir de los datos de la tabla 5.1.1, y haciendo uso de la ecuación 5.1.1 se obtiene el valor del parámetro de caracterización de la respuesta direccional establecido por la normativa. Los valores se pueden ver en la siguiente tabla.

Ángulo elevación $\varepsilon (^{\circ}) \pm 1^{\circ}$	Iluminación promedio E (lux) $\pm 8\%$	Respuesta teórica coseno $\cos(\varepsilon)$ (%)	Valor de $ f_2 $ (%)
0	100	100	0.00 ± 0.02
10	95	98	0.03 ± 0.02
20	88	94	0.07 ± 0.02
30	79	87	0.09 ± 0.02
40	78	77	0.01 ± 0.02
50	70	64	0.09 ± 0.02
60	64	50	0.28 ± 0.02
70	54	34	0.59 ± 0.02
80	35	17	0.99 ± 0.02
90	0.02	0	---

Tabla 5.1.2

En la figura 5.1.3, se muestra la comparativa entre los resultados experimentales y teóricos de la curva de respuesta direccional. A pesar de que la tendencia de la respuesta experimental del luxómetro no es exactamente la curva teórica esperada, los datos numéricos del cálculo del parámetro de caracterización que se muestran en la tabla 5.1.2 revelan que el valor numérico del parámetro de caracterización de la respuesta direccional del luxómetro puede ser considerado como apto, al no superar para ningún ángulo de incidencia testeado, el 1.5% en valor absoluto marcado por la normativa. [UNE-EN 13032-1]

La respuesta direccional presenta valores por defecto en los primeros 40° , mientras que a partir de 60° presenta valores por exceso. Este hecho provoca que el luxómetro subestime y sobreestime, de manera leve, la iluminación procedente de ángulos de elevación bajos y la iluminación de ángulos de elevación altos respectivamente.

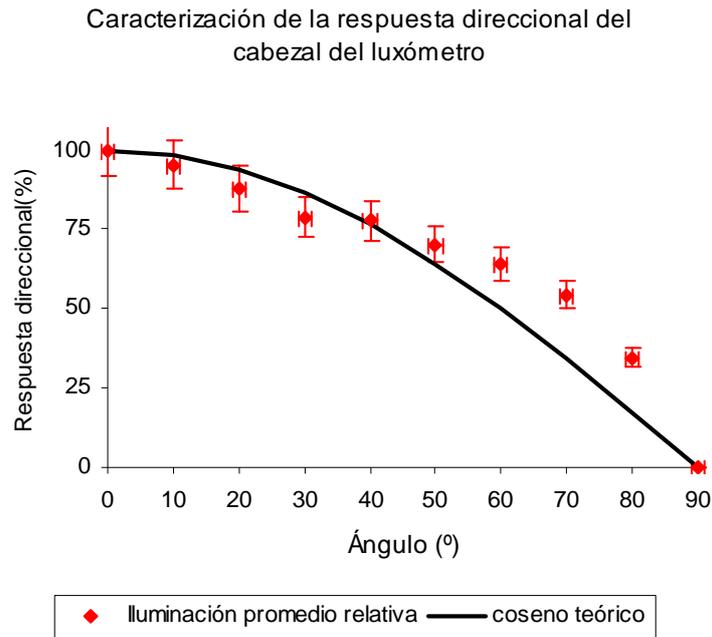


Fig 5.1.3 Resultados experimentales de la caracterización de la respuesta direccional del cabezal del luxómetro. Los puntos en rojo hacen referencia a las medidas experimentales, mientras que en negro se muestra la curva teórica de la respuesta cosenoidal. Las barras de error de los datos experimentales representa en abscisas $\pm 1^\circ$, referente al dispositivo utilizado para determinar la posición angular. En ordenadas se hace referencia al error del instrumento a caracterizar, en este caso, el sensor del luxómetro cuyo valor es de $\pm 8\%$ según el fabricante RS. [RS 2012]

5.1.2. Linealidad

En el apartado del estado del arte se definió la linealidad de un detector según la ecuación 5.1.2. [UNE-EN 13032-1]

$$f_3 = \frac{Y}{Y_{\max}} \times \frac{X_{\max}}{X} - 1 \quad \text{Ecuación 5.1.2}$$

Donde:

Y es la señal de salida debida a la iluminación del fotómetro en relación a una magnitud de entrada X .

X_{\max} es el valor de entrada correspondiente a la señal de salida máxima Y_{\max} .

Para comprobar la linealidad se ha escogido nuevamente como señal de entrada la misma fuente láser empleada en la caracterización de la respuesta direccional estudiada en el apartado anterior. La linealidad se ha calculado obteniendo la razón entre la señal de salida del detector y la señal de entrada.

La distancia de la fuente láser al luxómetro se mantuvo siempre igual para la detección de las dos señales de entrada comentadas. La distancia entre la fuente y el sensor es de 400 mm.

Los 5mW de potencia de salida del láser hacen referencia al valor notado como X_{max} . Empleando filtros neutros se ha atenuado esta señal de entrada hasta un valor de 1.3 mW, que hace referencia a la señal de entrada menor notada como X . La medida se ha realizado tres veces obteniéndose una dispersión menor al 2%. En la tabla 5.1.3 se muestran los valores promedio para las señales de salida obtenidas.

Señal de entrada (mW) $\pm 5\%$		Señal de salida E (lux) $\pm 8\%$		Parámetro de linealidad $ f_3 $ (%)
Símbolo	Valor	Símbolo	Valor	
X_{max}	5.0	Y_{max}	450	0.04 \pm 0.30
X	1.3	Y	1810	

Tabla 5.1.3

A la vista de la tabla anterior, y teniendo en cuenta la definición del parámetro de linealidad según la normativa europea, se observa como el valor del parámetro f_3 se encuentra por debajo del valor máximo permitido (0.2%) para considerar como apta la linealidad de un sensor de estas características, por lo que la linealidad del sensor puede ser considerada apta.

5.1.3. Respuesta espectral

En el apartado del estado del arte se definió el parámetro que cuantifica la respuesta espectral de un sensor como: [UNE-EN 13032-1]

$$f_1 = \frac{\int_0^{\infty} |s_{rel}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} V(\lambda) d\lambda} \quad \text{Ecuación 5.1.3}$$

Donde:

$s_{rel}^*(\lambda) \equiv E$ es la respuesta espectral relativa normalizada. En este caso, la iluminación medida con el luxómetro para cada longitud de onda.

$V(\lambda)$ es la eficiencia luminosa espectral del sistema visual humano para visión fotópica.

La curva de respuesta espectral del luxómetro empleado no es facilitada por el fabricante en su hoja de especificaciones, por lo tanto, se hace necesaria la realización de esta prueba de caracterización.

Para caracterizar la respuesta espectral del luxómetro se ha hecho uso de un sistema multiespectral de fuentes de luz que consta de 13 tipos diferentes de LEDs que cubren las longitudes de onda entre los 400 nm y 700 nm. Los 13 LEDs segmentan en intervalos el espectro visible con un valor promedio a los 25nm que coincide con el valor del ancho de banda promedio de los LEDs seleccionados.

#	Modelo/Referencia	Fabricante	Longitud de onda pico (nm) $\lambda_p \pm 2.5 \text{ nm}$
1	HUVL400-320B	Hero	400
2	LED430-06	Roithner	430
3	LED450-06	Roithner	450
4	LC503FBL1-15P-A3-00001	CREE	475
5	HLMP-CE13-35CDD	Avago	501
6	WP7113ZGC/G	Kingbright	520
7	L545-03	Marubeni	545
8	MC20369	Multicomp	568
9	LED600-03V	Roithner	600
10	MC20386	Multicomp	630
11	TLDR5800, RED	Vishay	650
12	LED680-02AU	Roithner	680
13	LED700-02AU	Roithner	700

Tabla 5.1.4

Los LEDs son alimentados y controlados mediante un driver proporcionado para dicha tarea por la empresa Mircropap. Mediante el driver es posible controlar la corriente de alimentación y por tanto el flujo luminoso que emite cada uno de los LEDs empleados. [Micropap 2012]

El flujo luminoso emitido por cada uno de los LEDs se ha medido con un radiómetro [IL 1700] para asegurar que la cantidad de energía que incide sobre el luxómetro es igual para cada longitud de onda.

Los resultados experimentales son recogidos en la tabla 5.1.5. En la primera columna se muestran las longitudes de onda de los LEDs; la segunda columna contiene; los valores absolutos promedio de una serie de tres medidas de la medida de iluminación para cada LED, la tercera refleja la iluminación relativa en % con respecto al máximo de iluminación promedio; la cuarta despliega los valores para la respuesta espectral del sistema visual humano y finalmente, en la quinta columna aparece el valor del parámetro que cuantifica como apto o no apto la curva de respuesta espectral del luxómetro.

Longitud de onda pico λ_p (nm) ± 25 nm	Iluminación promedio E (lux) ± 8 %	Iluminación promedio relativa E_r (%) ± 8 %	Respuesta Espectral fotópica $V(\lambda)$ (%)	Valor de $ f_1 $ (%)
400	3	6	0.13	0.23 \pm 0.02
430	4	8	0.64	
450	5	10	2.17	
475	7	14	7.30	
501	15	30	36.40	
520	22	44	72.90	
545	46	92	99.4	
568	50	100	100.00	
600	40	80	66.40	
630	15	30	26.90	
650	4	8	12.00	
680	4	8	3.11	
700	4	8	1.24	

Tabla 5.1.5

A la vista de los resultados de la tabla 5.1.5, se considera apta la respuesta espectral del sensor, ya que empleando la ecuación 5.1.3 se muestra cómo el valor del parámetro f_1 es inferior al máximo permitido y fijado por la normativa (1.5%).

Ya se comentó en el capítulo 3 que ha de existir un grado de correspondencia entre la respuesta espectral relativa y la eficiencia luminosa espectral del sistema visual humano. En

concreto, para visión fotópica, si se representan los valores de la respuesta espectral relativa medida experimentalmente y la respuesta espectral humana para visión fotópica, se obtiene la figura 5.1.4, donde se puede ver de forma más directa la correspondencia entre ambas curvas.

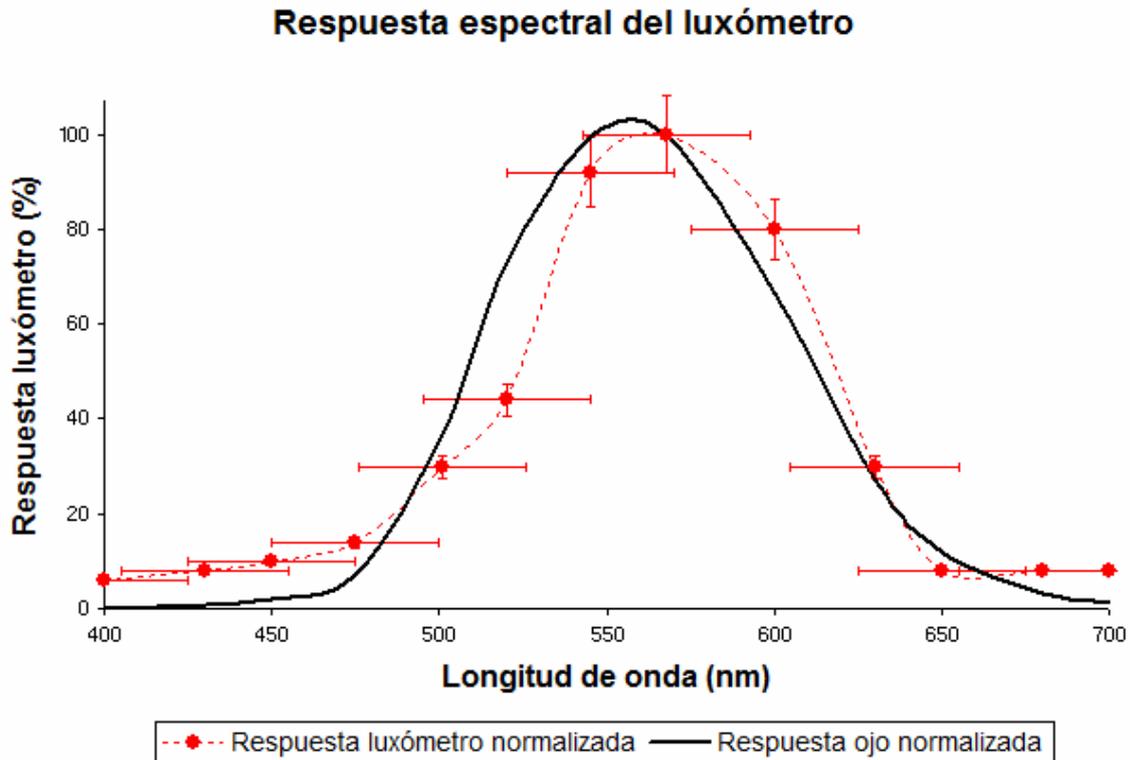


Fig 5.1.4 Resultados experimentales de la respuesta espectral mostrada por el luxómetro para diferentes longitudes de onda del espectro visible. La gráfica compara las respuestas del sistema visual humano y del luxómetro normalizadas y relativas a sus máximos. Se aprecia como la respuesta del luxómetro se encuentra desplazada ligeramente hacia el infrarrojo. El máximo según los datos experimentales se encuentra a una longitud de onda de 570 nm aproximadamente. También se puede advertir como en la zona del ultravioleta la respuesta es mayor que la que presenta el sistema visual humano a las mismas longitudes de onda. Las barras de error representan en abcisas el valor medio de ancho de banda y en ordenadas la precisión en porcentaje del valor de iluminación registrado. [Smith 2007]

La figura 5.1.4 muestra las respuestas espectrales normalizadas del sistema visual humano y del luxómetro. En la gráfica se advierte que el luxómetro responde con valores mayores a como lo hace el sistema visual humano en las zonas del ultravioleta y el infrarrojo. El máximo de la respuesta del luxómetro según los datos experimentales se encuentran en 568nm, 13nm por encima del valor de la mayor respuesta del sistema visual humano 555nm [Palmer 2009].

5.1.4. Dependencia con la temperatura

De la misma forma que los dos primeros parámetros, la dependencia con la temperatura también se expresó mediante la ecuación 3.3.5 en el estado del arte según la normativa europea correspondiente. [UNE-EN 13032-1]

$$f_5(T) = \frac{Y(T_2) - Y(T_1)}{Y(T_0)} \times \frac{\Delta T}{T_2 - T_1} \quad \text{Ecuación 5.1.4}$$

Donde:

$Y(T) \equiv E(T)$ es la señal de salida a la temperatura T, es decir, la iluminación medida para una temperatura T.

$Y(T_0)$ es la señal para la temperatura ambiente de referencia 25°C, es decir, la iluminación medida para una temperatura de 25°C.

$T_2, T_1, \Delta T$ son 40°C, 0°C y 2°C respectivamente.

La fuente luminosa en este caso ha sido nuevamente el diodo láser empleado en las caracterizaciones precedentes a ésta. La estabilidad de la fuente fue medida con el propio luxómetro sin observar cambios mayores al 1% durante un período de tiempo superior a dos horas.

Para simular las condiciones de temperatura, se ha empleado una cámara frigorífica para alcanzar los 0° y un horno industrial para el caso de 40°. Ambos sistemas aseguran la estabilidad de la temperatura gracias a termostatos incorporados.

Alcanzada la temperatura deseada, el luxómetro es introducido en la cámara u horno, durante al menos 15 min. Pasado este período, el luxómetro es extraído y colocado en un punto de referencia donde se mide la iluminación provocada por la fuente láser. El tiempo de extracción del luxómetro de los sistemas de regulación de temperatura es suficientemente corto (inferior a 10s) para que la temperatura del sensor no se desvíe de las condiciones térmicas en las cuales se desea medir. Este proceso se ha realizado tres veces para medida de

temperatura y en la tabla siguiente se muestran los valores promedio para la iluminación obtenida.

Símbolo	Temperatura T (°C) ±1 °C	Iluminación promedio E (lux) ±8 %	Valor de $ f_5 $ (%)
T1	0	109	0.01 ± 0.10
T0	25	97	
T2	40	92	

Tabla 5.1.6

Empleando la ecuación 5.1.4, se calcula el valor de $f_5(T)$ concluyendo que el valor de este parámetro es inferior a 0.2%, que es el máximo que exige la normativa y, por tanto, la respuesta de iluminación con respecto a la temperatura es considerada como apta. Si se representa la variación de la iluminación en función de la temperatura, se tiene la figura 5.1.5.

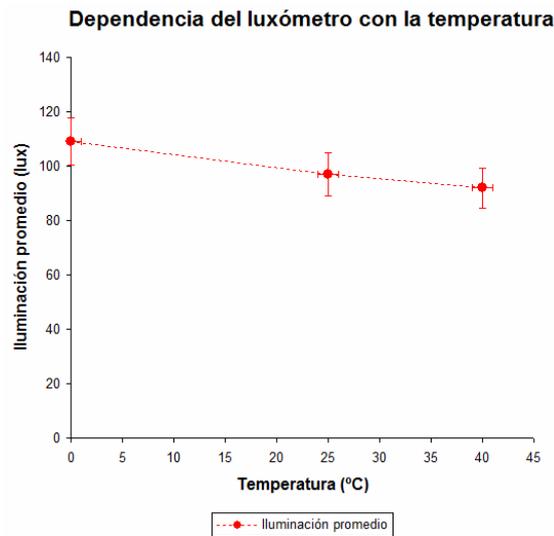


Fig 5.1.5. Gráfica de la dependencia del luxómetro con respecto a la temperatura. La tendencia indica que la respuesta del luxómetro desciende conforme aumenta la temperatura de medida llegando a ser de un 12% entre 0 °C y 40 °C.

5.1.5. Fatiga

La fatiga quedaba definida en la ecuación 3.3.4 de la forma:

$$f_4(t) = \frac{Y(t)}{Y(t_0 = 10s)} - 1 \quad \text{Ecuación 5.1.5}$$

Donde:

t es el tiempo transcurrido desde el comienzo de la iluminación en la cabeza del fotómetro con iluminación constante.

$Y(T) \equiv E(T)$ es la señal de salida en el instante t , es decir, la iluminación medida para un instante de tiempo determinado.

t_0 la lectura comienza 10s después de la iluminación. Estos 10s son un tiempo de referencia estipulado por la normativa europea.

Para determinar el parámetro que determina la fatiga se empleó de nuevo la fuente de luz láser. La prueba para caracterizar la fatiga del sensor del luxómetro se realizó iluminando el cabezal, comenzando a contar el tiempo justo en ese instante. Al inicio de la prueba, la iluminación registrada es anotada $Y(t = 0s)$. Transcurrido un período de 10s, se vuelve a realizar una lectura de la medida de la iluminación por el luxómetro $Y(t = 10s)$. Este proceso se ha realizado tres veces y la siguiente tabla refleja el valor promedio de las medidas experimentales. Finalmente, con ayuda de la ecuación 5.1.5 se obtiene el parámetro f_4 :

Iluminación promedio inicial $Y(t = 0s)$ (lux) $\pm 8\%$	Iluminación promedio tras 10s transcurridos $Y(t = 10s)$ (lux) $\pm 8\%$	Valor de $ f_4 $ (%)
694 Lux	695 Lux	0.002 \pm 0.001

Tabla 5.1.7 valores experimentales del proceso de caracterización de la fatiga del luxómetro.

A la vista de los resultados de la tabla anterior, se puede concluir que la fatiga del luxómetro empleado en la medida es apta ya que el valor máximo permitido por la normativa es de 0.1%.

5.1.6. Cambio de intervalo

Finalmente, el cambio de intervalo es también contemplado en el estado del arte y queda definido por la siguiente ecuación: [UNE-EN 13032-1]

$$f_6 = \left| \frac{Y_B}{k \times Y_A} - 1 \right| \quad \text{Ecuación 5.1.6}$$

Donde:

$k = 10$ por ser la relación de escala entre los valores máximos que acotan los intervalos de medida que presenta el luxómetro [0-2000] Lux y [2000-20000] Lux.

Y_A es la lectura en el intervalo A (menor) para un valor de entrada X_A .

Y_B es la lectura en el intervalo B (mayor) para un valor de entrada $k * X_A$.

Las lecturas $Y_A \equiv E_A$ y $Y_B \equiv E_B$ son las iluminaciones registradas en el intervalo A [0-2000] Lux y el intervalo B [2000-20000] Lux respectivamente. La fuente de luz seleccionada fue nuevamente el láser de 5mW de potencia. Para conseguir dos señales de entrada con una relación de 1:10, se empleó el uso de filtros neutros del mismo modo a como ya se utilizaron en la caracterización del parámetro de linealidad. Las medidas experimentales se realizaron tres veces. La siguiente tabla muestra los valores promedio de la prueba experimental realizada:

Señal de entrada intervalo A $X_A = 1mW \pm 5\%$ Iluminación promedio en el intervalo A. $Y_A \equiv E_A$ (lux) $\pm 8\%$	Señal de entrada intervalo B $X_B = 5mW \pm 5\%$ Iluminación promedio en el intervalo B. $Y_B \equiv E_B$ (lux) $\pm 8\%$	Valor de $ f_6 $ (%)
721	6460	0.10 \pm 0.08

Tabla 5.1.8 valores experimentales del proceso del cambio de intervalo.

La tabla anterior muestra que el parámetro de cambio de intervalo presenta el valor máximo exigido por la normativa (0.10%). Aún así, el parámetro de cambio de intervalo presenta un valor que puede ser considerado como apto.

En este caso, la caracterización de este parámetro no ha sido realizada para el cambio entre el segundo y tercer intervalo de medida que también presenta el luxómetro seleccionado para trabajar en esta tesis. La razón es que a nivel práctico no hay necesidad de evaluar valores de iluminación superiores a 20000lux. Estos valores de iluminación no son representativos de ninguna situación que pueda encontrarse en los entornos de medida que son objeto de este trabajo.

5.2 Sensor CMOS.

El sensor CMOS utilizado es el correspondiente a la cámara digital uEye de la casa comercial IDS [IDS 2012]. El sensor CMOS de la cámara es un sensor de formato ½" modelo MT9M001 [APTINA 2012] y cuenta con 1280x1024 píxels, el sensor es monocromo y presenta una profundidad de niveles de gris de 8bits. La velocidad máxima de captura de 25 fotogramas por segundo se registra en modo vídeo y la interfaz de comunicación es USB. También dispone de una rosca adaptadora para objetivos tipo C [Kineo 2009].

Tanto las caracterizaciones de la linealidad, la respuesta espectral y el ruido de la cámara han sido realizados teniendo el objetivo gran angular acoplado en la posición de enfoque a infinito, dado que el sistema siempre trabaja como un conjunto y nunca por separado.

5.2.1. Linealidad

La caracterización de la linealidad del sensor CMOS ha sido realizada mediante dos análisis distintos. Por un lado se ha estudiado la respuesta del sensor para una serie de patrones calibrados con reflectancias y luminancias conocidas. [Robyn 2012] Las condiciones de iluminación y el tamaño de los patrones son idénticos para todas las medidas realizadas. Por otro lado se ha estudiado como responde el sensor en relación a la variación del tiempo de exposición de la cámara. [Arranz 2005, Roper 2004, Fuentes 1999, Sierra 2002]



Fig 5.2.1 Ejemplo de cámaras correspondientes a los modelos fabricados por la casa comercial IDS. A la izquierda, se puede ver la cámara empleada en la caracterización de su sensor trabajando en conjunto con el objetivo gran angular. [EDMUND 2012]

Caracterización de la linealidad en función de la luminancia

Los patrones seleccionados son los correspondientes a la escala de grises normalizada del estándar Colorchecker DC situados en la parte central de la carta de colores. [Robyn 2012] Cada uno de los patrones presenta unos valores Lab estandarizados y tabulados. Para la caracterización se emplearon los patrones numerados que pueden verse a continuación del 1 al 16.

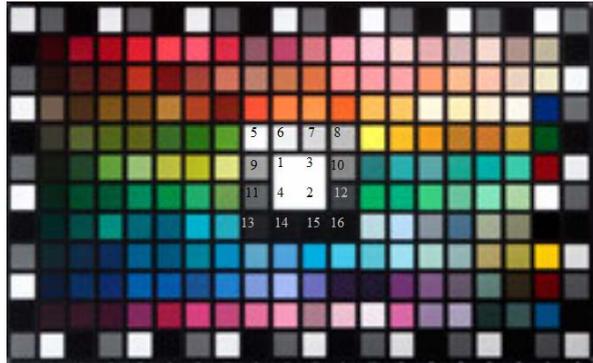


Fig 5.2.2 Carta de color estandarizada Colorchecker DC [Robyn 2012]. Los colores empleados para la caracterización de la linealidad del sensor CMOS son los que aparecen numerados desde el 1 (mayor valor de luminancia) hasta el 16 (menor valor de luminancia).

Bajo las mismas condiciones de iluminación, y evitando la saturación del sensor, se evaluó la respuesta del sensor cuantificando la respuesta del sensor para cada captura correspondiente a cada patrón de gris.

Patrón de gris	Luminancia (cd/m ²) ± 1.6%	Valor relativo de gris promedio (%) ± 1.6%
1	96.1	97.3
2	96.1	100.0
3	96.0	97.7
4	96.0	98.8
5	94.0	92.3
6	85.3	85.2
7	78.3	71.8
8	71.1	65.4
9	63.4	59.7
10	56.5	47.7
11	48.4	38.5
12	40.6	26.3
13	32.4	15.2
14	25.1	2.17
15	22.2	1.14
16	20.5	0.95

Tabla 5.2.1 Datos de la respuesta del sensor CMOS cuantificada según la suma de niveles de gris registrada para cada captura correspondiente a cada patrón de gris estandarizado. [Robyn 2012]

Las pruebas han sido realizadas con el objetivo gran angular acoplado a la cámara. El objetivo trabaja con apertura fija ($f\#=2.0$). [Arranz 2005] Para cada luminancia de cada uno de los cuadros de gris estandarizados se obtiene el valor promedio del nivel de gris. Los valores numéricos se muestran en la tabla 5.2.1.

Los datos tabulados anteriormente responden a la siguiente figura:

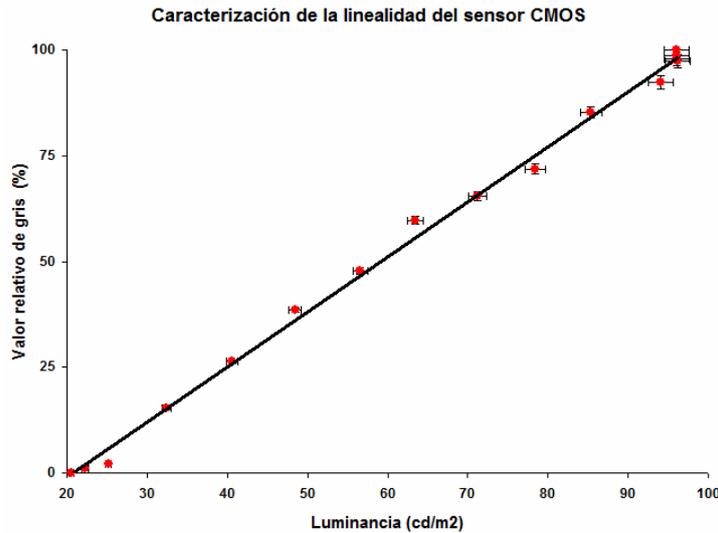


Fig 5.2.3 Gráfica correspondiente a la caracterización lineal del sensor CMOS trabajando en conjunto con el objetivo gran angular. Los resultados experimentales (en rojo) muestran una tendencia lineal en todo el rango de luminancia salvo en los extremos con respecto a la recta de regresión que ajusta dichos datos experimentales.

Los resultados experimentales muestran una respuesta del sensor de tipo lineal en función de la luminancia aceptable, si bien se pueden detectar en las partes de bajas y altas luminancias que presentan comportamientos no tan lineales como en el resto del rango de valores estudiado. No obstante, el coeficiente de correlación presenta un valor de $R^2 = 0.9971$, un valor que garantiza una linealidad aceptable del sensor.

Caracterización de la linealidad en función del tiempo de exposición

La caracterización de la linealidad del sensor en función del tiempo de exposición ha sido realizada para cuatro tiempos de exposición distintos. La cámara presenta un rango de variación del tiempo de exposición en 11 niveles prefijados con valores de entre 37 μ s y 983ms [IDS 2010]. Los tiempos de exposición seleccionados para la caracterización han sido los que aparecen resaltados en la siguiente tabla. [Arranz 2005, Fuentes 1999, Sierra 2002]

Tiempo de exposición de la cámara (s)
3.7×10^{-5}
9.8×10^{-2}
2.0×10^{-1}
2.9×10^{-1}
$3.9 \times 10^{-1} \pm 10^{-3}$
4.9×10^{-1}
$5.9 \times 10^{-1} \pm 10^{-3}$
6.9×10^{-1}
$7.9 \times 10^{-1} \pm 10^{-3}$
8.8×10^{-1}
$9.8 \times 10^{-1} \pm 10^{-3}$

Tabla 5.2.2

El montaje experimental en este caso es como indica la figura 5.2.4. La cámara, acoplada siempre al objetivo gran angular enfocado a infinito, es colocada en una cavidad cuyo interior presenta las superficies difusoras blancas, de forma que la primera lente del objetivo queda en el interior de dicho espacio a través de una abertura de diámetro coincidente al de la montura del objetivo. De igual forma es introducido el sensor del luxómetro en otra de las caras de la cavidad. Finalmente, en una última cara de la cavidad es colocada una fuente de luz blanca lambertiana, en este caso un LED [Philips 2012] que puede ser alimentado de forma externa variando la intensidad que circula por el circuito. La fuente ha sido apantallada para que no incida luz directa de la fuente sobre el objetivo gran angular.

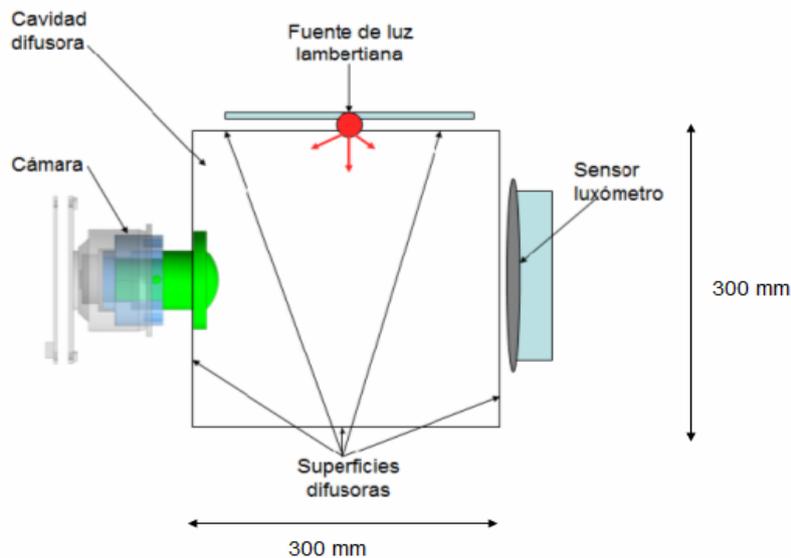


Fig. 5.2.4 Esquema experimental para la caracterización de la linealidad de la cámara. La fuente de luz permite ser alimentada de forma gradual permitiendo un aumento de la emisión de flujo luminoso en el interior de la cavidad difusora. De esta forma se consigue registrar para cada valor de corriente determinado un valor de iluminación y, en consecuencia, una respuesta del sensor para cada tiempo de exposición analizado.

La fuente luminosa es alimentada de forma gradual de manera que se puede aumentar el flujo luminoso dentro de la cavidad difusora. El sensor del luxómetro es el encargado de facilitar los valores de referencia en la alimentación de la fuente. Para cada tiempo de exposición el paso de iluminación fijado ha sido de 10 lux.

A medida que la corriente aumenta, se incrementa también la iluminación y en último término, la respuesta de la cámara. La linealidad del sensor se ha analizado comparando la respuesta de la cámara cuantificando el valor promedio de los niveles de gris para cada valor de iluminación.

Los valores numéricos pueden verse en la tabla 5.2.3 de valores para cada una de los tiempos de exposición seleccionados, indicando la iluminación a partir de la cual se detecta el efecto de saturación del sensor.

De manera gráfica, la tabla 5.2.3 queda representada como se muestra a continuación:

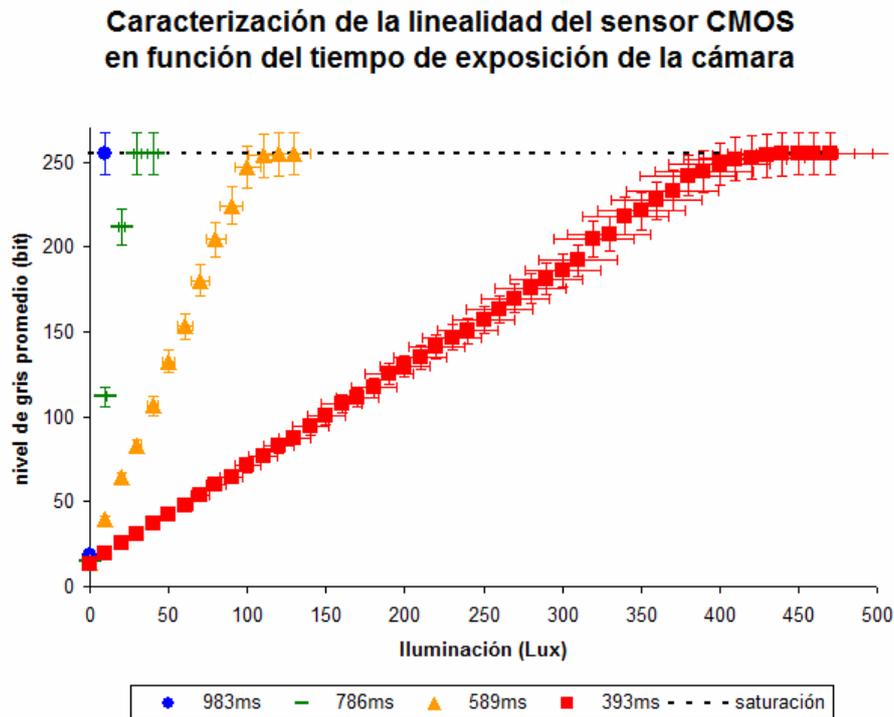


Fig 5.2.5 Gráfica correspondiente a la caracterización lineal del sensor CMOS trabajando en conjunto con el objetivo gran angular en función de la iluminación recibida para distintos tiempos de exposición. Los resultados experimentales muestran una tendencia lineal en todo el rango de luminancia salvo en los valores de iluminación altos, que consiguen saturar el sensor para cada tiempo de exposición.

Capítulo 5.- Caracterización del instrumental empleado

iluminación Lux ± 8%	Valor promedio de gris para un tiempo de exposición de 0.983 ± 10^{-3} s	Valor promedio de gris para un tiempo de exposición de 0.786 ± 10^{-3} s	Valor promedio de gris para un tiempo de exposición de 0.589 ± 10^{-3} s	Valor promedio de gris para un tiempo de exposición de 0.393 ± 10^{-3} s
0	19	15	14	13
10	255	112	40	19
20	SATURACIÓN	211	64	25
30		255	83	31
40		SATURACIÓN	106	37
50			132	42
60			153	48
70			180	54
80			205	60
90			224	64
100			247	71
110			SATURACIÓN	77
120				83
130				88
140				94
150				100
160				108
170				111
180				117
190				125
200				130
210				135
220				141
230				147
240				151
250				157
260				163
270				170
280				176
290				181
300				186
310				192
320				205
330				208
340				218
350				221
360				227
370				233
380				242
390				245
400				249
410				SATURACIÓN
420				
430				
440				
450				
460				
470				
480				

Tabla 5.2.3

La gráfica 5.2.5 muestra cuatro series de puntos experimentales referidos al valor medio que proporciona la cámara para cada valor de iluminación. Conforme el valor del tiempo de exposición disminuye, aumenta el rango dinámico de trabajo del sensor. Las medidas se han realizado hasta alcanzar valores máximos de iluminación de alrededor de 500 lux. Este valor de iluminación de referencia se ha escogido como límite superior de trabajo ya que no son esperables valores mayores en instalaciones de alumbrado público.

Para cada serie de medida, el efecto de saturación del sensor comienza a tener importancia aproximadamente en torno al 80% del valor máximo de iluminación alcanzado. Eliminando estos valores de la respuesta del sensor, podemos establecer una respuesta marcadamente lineal del sensor a los cambios de iluminación en las distintas series de medida referidas al tiempo de exposición.

El parámetro de no linealidad [Roper 2004, Arranz 2005] para cada tiempo de exposición se expresa en la tabla 5.2.4. El porcentaje de no-linealidad (NL) se extrae de la razón entre la desviación máxima positiva ($\sigma_{\max,+}$) y negativa ($\sigma_{\max,-}$) y el valor máximo de nivel de gris ($N_{g_{\max}}$). Se observa cómo a medida que el coeficiente de correlación es más próximo a la unidad el parámetro de no linealidad disminuye.

Tiempo de exposición (ms)	Parámetro de no linealidad NL	
	$NL = \frac{ \sigma_{\max,+} + \sigma_{\max,-} }{ N_{g_{\max}} } 100$ (%)	Coefficiente de correlación
983	0.000	1.0000
786	0.385	0.9742
589	0.030	0.9994
393	0.034	0.9992

Tabla 5.2.4

El valor del parámetro de no linealidad que establece como apto un sensor responde a un valor de 0.5% aproximadamente. Los valores del parámetro de no linealidad obtenidos son inferiores. Además, los coeficientes de correlación de estos ajustes presentan valores muy similares a los obtenidos en la caracterización de la linealidad mediante la variación de luminancia. El sensor CMOS puede por tanto ser considerado como lineal.

5.2.2. Respuesta espectral

Los métodos basados en medidas de cartas de color son empleados para la caracterización espectral de cámaras digitales. [Lasarte 2009, Hubel 1994] No obstante, y por paralelismo en el método de caracterización espectral del luxómetro, para caracterizar la respuesta espectral del sensor CMOS y el objetivo gran angular, se ha hecho uso del mismo sistema multispectral de fuentes de luz empleado en la caracterización espectral del luxómetro.

Para que tanto el luxómetro como la cámara sean calibrados bajo las mismas condiciones de fuentes de luz, se ha empleado como muestras espectrales cada uno de los 13 LEDs de la (tabla 5.1.3). El flujo luminoso incidente sobre el sistema cámara-objetivo es igual para cada LED. La respuesta para cada longitud de onda se ha calculado como el valor promedio de los píxeles iluminados para cada LED. De esta forma, se representan los valores en escala relativa en % en la figura 5.2.6.

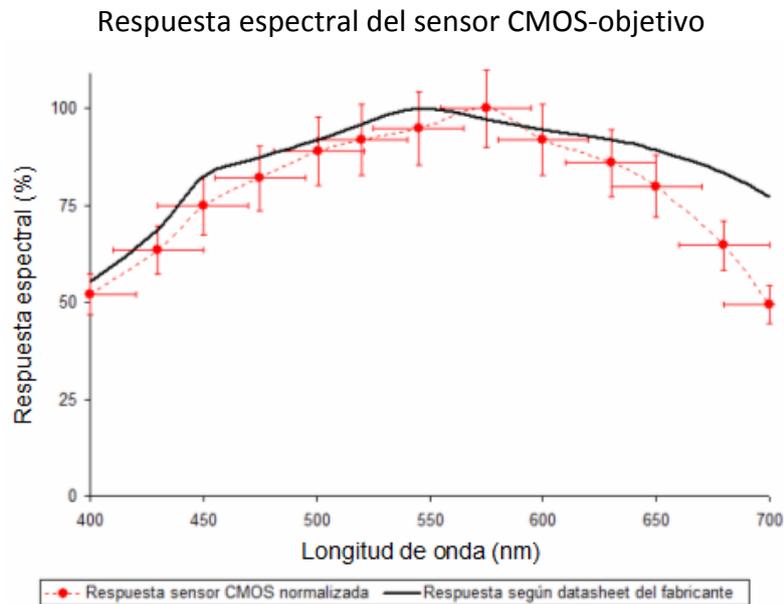


Fig 5.2.6 Resultados experimentales de la respuesta espectral mostrada por el sensor CMOS-objetivo para el espectro visible. La gráfica compara las respuestas del sensor según el fabricante y las medidas de caracterización realizadas. Ambas curvas de respuesta presentan un comportamiento espectral muy similar. La variación entre ellas se debe a que las fuentes de luz no son puramente monocromáticas, por lo cual introduce de forma inevitable variaciones en la medida experimental. Del mismo modo, dicha variación obedece al hecho de que la curva experimental corresponde no solo al sensor sino al sistema sensor CMOS-objetivo. [APTINA 2012].

La figura 5.2.6 muestra que el sistema sensor CMOS-objetivo no presenta una respuesta espectral como la del sistema visual humano. Este hecho implica que la respuesta espectral será siempre diferente de la esperada por un sensor equipado con un filtro fotométrico.

Debido a restricciones mecánicas en la montura de la cámara con el objetivo gran angular, no se ha podido colocar ningún filtro fotométrico corrector. En consecuencia, se optó por trabajar con el objetivo en la posición que dictan las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 4 prescindiendo del filtro.

Se ha efectuado el cálculo de la diferencia en la respuesta espectral proporcionada por la cámara respecto a la curva de respuesta espectral del sistema visual humano para cada uno de los tipos de lámparas más comunes usados en las instalaciones de alumbrado público. En concreto, nos referimos a las lámparas de vapor de sodio a alta y baja presión y también las lámparas de vapor de mercurio.

Lámparas de vapor de mercurio

Las lámparas de vapor de mercurio son fuentes de luz blanca que presentan un espectro de emisión con picos en las diferentes regiones del espectro visible (Fig. 5.3.7). Calculando la integral que encierra la curva de emisión espectral de la lámpara pesada por cada una de las curvas espectrales respectivas al ojo humano y al sensor, se obtiene la diferencia cuantitativa de la respuesta espectral entre la esperada por un sensor con filtro fotométrico y por el empleado en esta tesis.

El resultado es que la cámara llega a registrar un 70% más de energía en cada píxel en ausencia del filtro fotométrico. Se ha de notar, no obstante que los picos de emisión en la zona del ultravioleta (Fig. 5.2.7) quedarán muy atenuados por los vidrios de protección con los que van equipados este tipo de lámparas, por lo que en realidad el porcentaje de energía no tenida en cuenta es de un 20% aproximadamente.

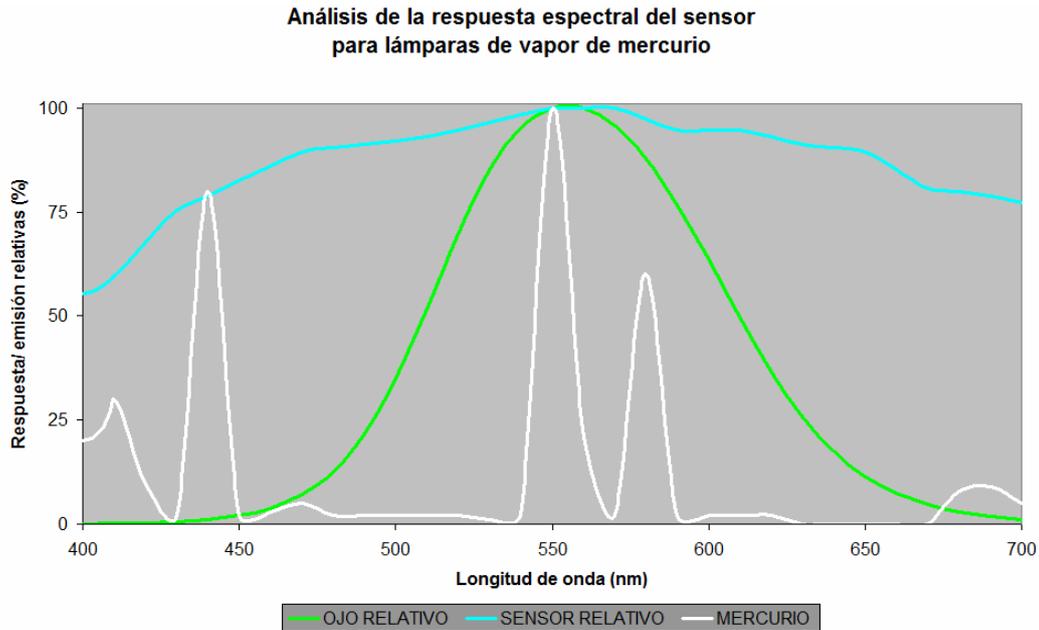


Fig. 5.2.7 Representación de la emisión espectral de una lámpara de vapor de mercurio sin vidrio de protección en comparación con las curvas de respuesta espectral del ojo humano y el sensor CMOS empleado en las medidas fotométricas. [UDC 2012]

Lámparas de vapor de sodio a baja y alta presión

Las lámparas de vapor de sodio a baja presión son fuentes de luz muy monocromáticas. Por su particular emisión espectral son utilizadas en entornos donde la reproducción cromática no es crítica. En la figura 5.2.8. Se puede ver su espectro, al que ya hemos hecho referencia cuando se describían las lámparas de mercurio.

La diferencia en el caso de las lámparas de sodio a baja presión es de un 23%. Esto significa que el sensor capta una quinta parte más de energía cuando trabaja sin filtro fotométrico que emule la respuesta espectral del ojo humano. Por lo que respecta a las lámparas de vapor de sodio a alta presión, la diferencia asciende hasta el 32%.

Dado que la medida que se realiza con ayuda del objetivo gran angular y el sensor CMOS es una medida relativa al valor absoluto proporcionado por el luxómetro, las diferencias aquí calculadas no presentan una restricción crítica para la medida, siempre y cuando el conjunto de fuentes luminosas del entorno de medida sea del mismo tipo de emisión espectral. Como se verá en el capítulo de resultados, se han seleccionado entornos de medida donde la variabilidad del espectro de emisión es nula con el fin de validar correctamente todo el trabajo teórico y experimental desarrollado.

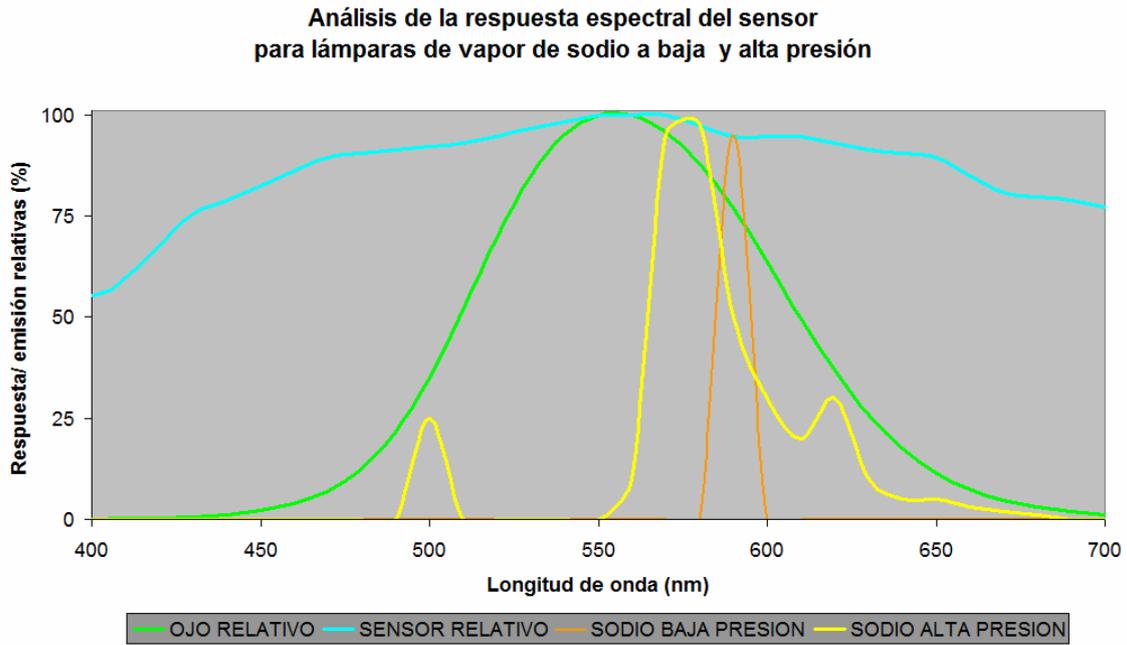


Fig. 5.2.8 Representación de la emisión espectral de una lámpara de vapor de sodio a baja y alta presión en comparación con las curvas de respuesta espectral del ojo humano y el sensor CMOS empleado en las medidas fotométricas. [UDC 2012]

5.2.3. Ruido

Al final del capítulo 4 se estudiaron los tipos de ruido que pueden presentarse en un sensor digital. Los tipos de ruido eran tres, a saber, el ruido patrón, aleatorio y de bandas. Otro tipo de denominación al efecto del ruido puede encontrarse en [Wolfe 1998]. Veamos como se presentan cada uno de ellos en el sensor empleado en esta tesis doctoral.

Ruido patrón

El ruido patrón ha sido caracterizado con la ayuda de un programa comercial proporcionado por el fabricante de la cámara [IDS 2012]. El programa presenta por pantalla los píxeles que responden de manera errónea a una señal de oscuridad total. Con una iluminación inferior a los 0.5lux, la cámara debería presentar todos sus píxeles con valores de niveles de gris cercanos a 0. Sin embargo, como se ve en la siguiente figura, existe un conjunto de píxeles de respuesta anómala que presentan valores más elevados del orden de 20-25 de nivel de gris. [Healey 1994, Takeuchil 1993]

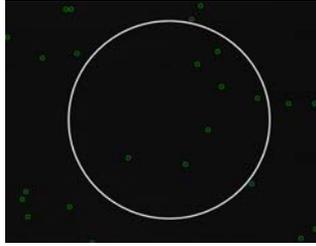


Fig 5.2.9 Captura real del sensor CMOS tomada por el programa comercial para marcar los píxeles anómalos que se encuentran dentro de las circunferencias verdes. La circunferencia blanca delimita el tamaño del registro fotométrico correspondiente a la imagen creada por el objetivo gran angular sobre el plano del sensor CMOS. El valor de gris de los píxeles anómalos ha sido restado en cada proceso de captura.

Ruido aleatorio y en bandas

Para evaluar el ruido aleatorio, se realizó una serie de capturas con el menor tiempo de exposición disponible de la cámara. La iluminación siempre ha sido menor a 0.5lux. Las capturas se hicieron en instantes de tiempo distintos a lo largo de una hora de duración y se promediaron para evaluar el ruido aleatorio, que como ya se comentó es un tipo de ruido que está presente en los sistemas electrónicos y que cambia continuamente.

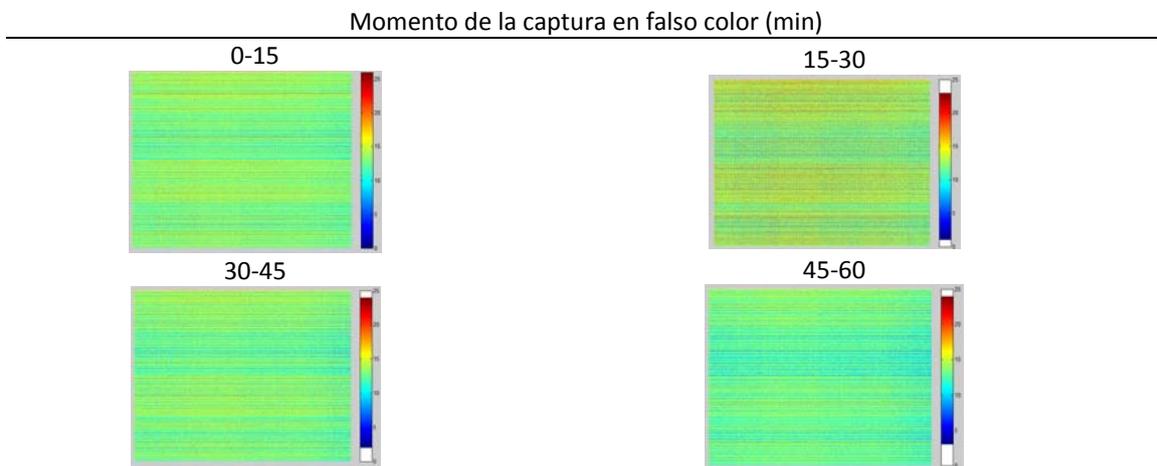


Tabla 5.2.4

A partir de las capturas mostradas en la tabla 5.3.4 se ha obtenido el patrón del ruido aleatorio que presenta el sensor. Se aprecia cómo a medida que transcurre el tiempo el valor mínimo que presentan los píxeles aumenta, desapareciendo aquellos con valores totalmente nulos. Por otro lado, los valores máximos se mantienen estables con una variación de un 7%.

El patrón promedio se ha empleado en el procesado de todas las capturas realizadas en los entornos de medida que han sido objeto de medida de esta tesis doctoral. El valor de ruido aleatorio para un píxel cualquiera del sensor es de 13 niveles de gris. (Fig. 5.2.10.)

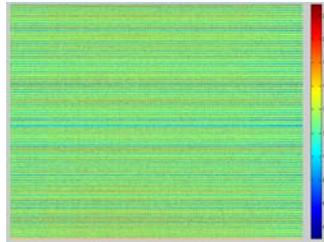


Fig. 5.2.10 Patrón promedio referente al ruido aleatorio del sensor CMOS. El patrón de ruido aleatorio promedio ha sido obtenido a partir de las capturas mostradas en la tabla 5.2.4.

Se ha analizado el espectro en frecuencias del patrón promedio mostrado en la figura 5.2.10. A partir del cálculo de la Transformada de Fourier (Fig. 5.2.11. superior). La transformada revela un ruido de carácter aleatorio al no advertirse ninguna periodicidad o estructura en el patrón de frecuencias calculado.

Cuando la iluminación recibida en el sensor a través del sistema óptico es superior a 5 Lux, se aprecia un efecto de ruido en bandas. El espectro en frecuencias para un registro de un patrón con iluminación de 10lux, en lugar de los 0.5lux que se han mantenido como valor máximo en el análisis del ruido aleatorio, se aprecia en el eje vertical del espacio de frecuencias (Fig. 5.2.11 inferior), una estructura repetitiva que indica un efecto de bandas en la componente horizontal en el espacio de medida.

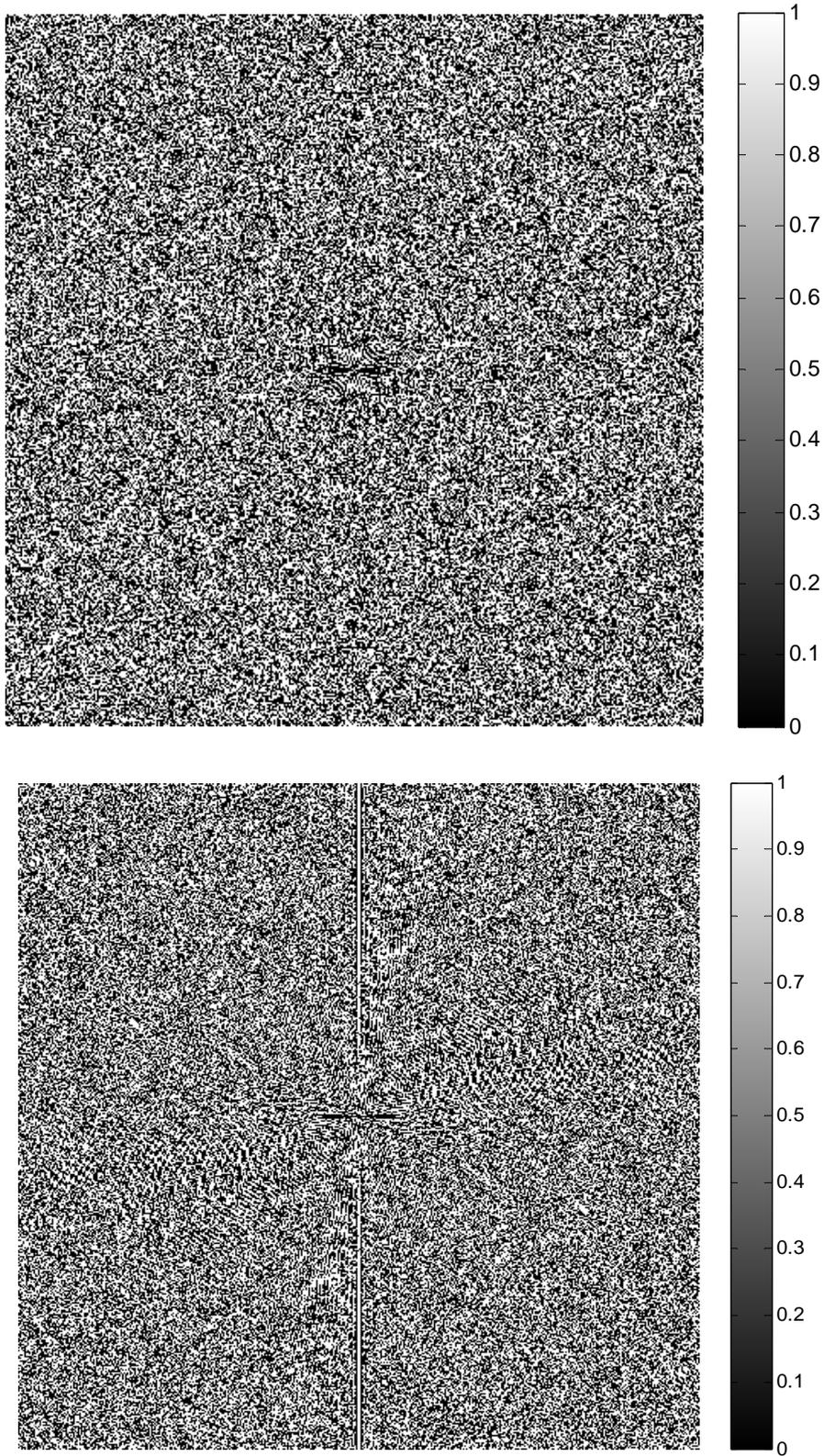


Fig. 5.2.11 Transformada de Fourier bidimensional normalizada a la unidad del patrón de ruido aleatorio (superior). Transformada de Fourier bidimensional normalizada a la unidad para el análisis del ruido en bandas (inferior). [Nieves 2002, Goodman 2005]

5.3 Objetivo gran angular

El objetivo gran angular utilizado en esta tesis doctoral es el modelo fisheye Lensagon BFM2320 [Lensation 2012]. El objetivo está diseñado para trabajar con sensores de $\frac{1}{2}$ " con un tamaño de píxel de 5 μ m. Su campo de visión es de 185° y su focal y apertura son respectivamente 2.3mm y 2. Dispone de una montura M12x0.5 y tiene un peso de 13g.



Fig. 5.3.1 Objetivo gran angular caracterizado y empleado en la medida fotométrica de esta tesis doctoral. [Lensation 2012]

Los parámetros fundamentales a caracterizar son los 3 ya mencionados en la introducción de este capítulo. El análisis de enfoque del objetivo permite situar mecánicamente el plano focal del objetivo de manera precisa para trabajar en las condiciones teóricas más favorables posibles de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el capítulo 4 (ecuación 4.2.20).

Una vez situado correctamente el objetivo, se caracteriza la distorsión del objetivo, a partir de dicha caracterización se dispone del conocimiento de la correspondencia geométrica entre las direcciones de incidencia de la luz y los píxeles iluminados en el registro fotométrico sobre el plano del sensor CMOS. Finalmente, el análisis relativo a la transmitancia será el encargado de proporcionar información acerca de qué cantidad de energía emerge del sistema óptico para cada dirección angular.

5.3.1. Enfoque

En el capítulo 4 se estableció la ecuación angular de correspondencia energética (ecuación 4.2.20). Dicha ecuación establece que el sistema óptico debe trabajar enfocando a infinito. Dado que el objetivo gran angular presenta una rosca M12x0.5, ha sido necesario

realizar una pieza mecánica de acople entre la cámara CMOS y el objetivo con el fin de poder situar el plano del sensor CMOS a la distancia correcta de trabajo.

Para caracterizar y establecer el enfoque, se ha hecho uso de una fuente de luz láser que se hace incidir en la dirección del eje óptico del objetivo. [Edmund 2012b] La pieza mecánica presenta una rosca interior donde se acopla el objetivo y una rosca exterior que se acopla a la montura de la cámara. Además, se dispone de dos orificios roscados para la colocación de dos prisioneros que fijarán la posición del objetivo una vez sea determinada.

Para hallar la posición de enfoque se hizo uso de la herramienta de adquisición de imagen de MATLAB [MATLAB 2011]. Dado que el haz láser simula una fuente muy lejana en el espacio objeto, con ayuda de la herramienta de Matlab se registró la imagen del láser y se determinó la posición del objetivo para la cual se obtenía una imagen de menor tamaño.

En esta tarea fue necesario el uso de filtros neutros para no saturar la imagen obtenida en la cámara. Una vez obtenida la imagen de menor tamaño, se procedió a fijar el objetivo en esa posición. En la figura 5.3.2, se presenta una serie de capturas correspondientes al proceso de enfoque.



Fig. 5.3.2 Capturas correspondientes al proceso de enfoque del objetivo mediante una fuente láser. La captura resaltada en verde registrada mediante la herramienta "Image acquisition" de Matlab [MATLAB 2011] corresponde al menor tamaño de imagen. En esta posición, el sensor CMOS se sitúa en el plano focal del objetivo gran angular. [McMenemy 2003]

5.3.2. Distorsión

La distorsión de un sistema óptico se define como la variación del aumento lateral en función de la distancia del objeto al eje óptico del sistema. Es una de las cinco aberraciones de tercer orden de los sistemas ópticos, a saber, la aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y finalmente la distorsión [Smith 2007, Kingslake 2010, Mahajan 1998].

En los objetivos tipo fisheye, la distorsión es la aberración óptica que mayor peso presenta en la formación de imagen. Cuantitativamente, el efecto de la aberración es entre dos y tres órdenes de magnitud superior a la suma de todas las contribuciones de las restantes aberraciones de tercer orden. Por tanto, es de vital importancia prestar una atención especial a esta característica. [Welford 1989, Smith 2007, Toscani 2012]

Para analizar la distorsión del objetivo utilizado en las medidas de esta tesis, se ha empleado una configuración geométrica equivalente a la mostrada en la caracterización de la respuesta direccional del luxómetro. De nuevo, se ha empleado un láser como fuente luminosa fija situada a unos 400mm de distancia de la primera lente del objetivo. En este caso, el objetivo se encuentra previamente enfocado y montado sobre la cámara en un punto de pivotaje que permite girar el sistema objetivo-cámara.

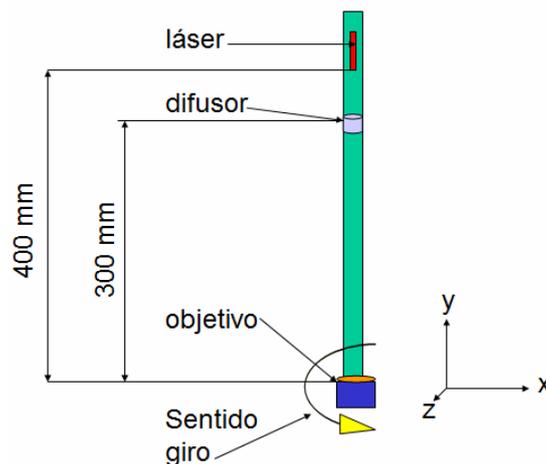


Fig. 5.3.3 Esquema de la disposición geométrica del montaje experimental para la caracterización de la distorsión del objetivo fisheye.

Entre la fuente láser y el sistema objetivo-cámara se ha colocado un elemento difusor a unos 300 mm de la primera superficie del objetivo fig. 5.3.3. El elemento difusor consiste en un diafragma de 15mm de diámetro por 10mm de profundidad sobre el que se ha colocado una lámina difusora de metacrilato [ALCOM 2012]. El objetivo de este elemento es doble. Por un lado, redistribuir la energía del haz láser para no saturar el sensor, y por otro provocar sobre la superficie de dicho elemento difusor una mancha de luz uniforme que actúe como objeto extenso para la formación de la imagen en las diferentes posiciones angulares a caracterizar. El tamaño de la imagen es apropiado para calcular los centroides de posición en cada ángulo de incidencia estudiado.

Girando el sistema objetivo-cámara para todo el rango de ángulo de elevación (0° - 90°), en este caso cada 5° , se captura una imagen para cada posición angular y se calcula el centroide de la misma y su distancia al eje óptico del sistema. En cada captura de la tabla 5.3.1, se ha eliminado el ruido de fondo empleando un offset. Una vez filtrado el ruido existente en el área de captura se procede a calcular el centroide de la imagen registrada sobre el sensor.

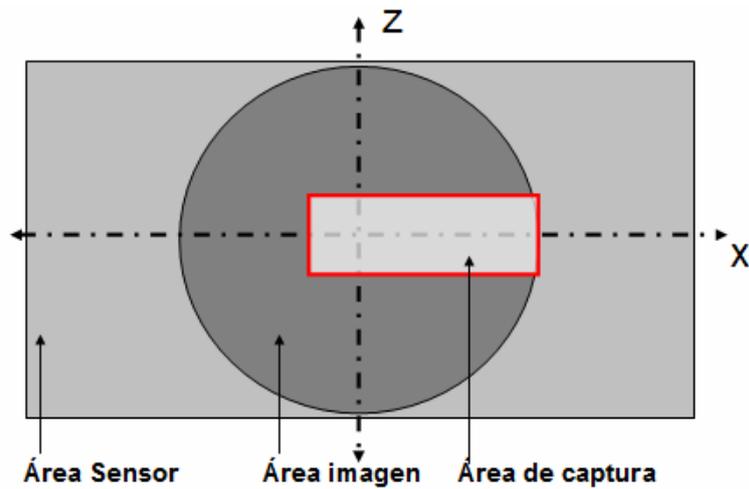


Fig 5.3.4 Esquema de la zona seleccionada para la caracterización de la distorsión del objetivo gran angular. La zona delimitada en rojo corresponde a las capturas que se muestran en la tabla 5.3.1.

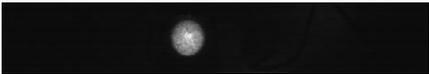
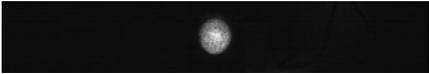
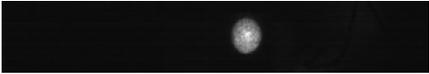
Imagen capturada	Ángulo de elevación ($^{\circ}$) $\pm 1^{\circ}$
	0
	5
	10
	15
	20
	25
	30
	35
	40
	45
	50
	55
	60
	65
	70
	75
	80
	85
	90

Tabla 5.3.1 capturas realizadas por el objetivo gran angular para la caracterización de la distorsión. Las capturas son filtradas mediante un offset para eliminar el ruido de fondo que existe en las capturas y calcular correctamente el centroide de cada imagen.

A partir de las posiciones de las imágenes que aparecen en la tabla 5.3.1, se calculan los centroides de las imágenes registradas del objeto extenso. Se muestra a continuación las posiciones respecto al centro del sensor para cada centroide.

Ángulo (°) ±1°	Distancia al centro del registro fotométrico (píxeles) ± 1píxel	Distancia al centro del registro fotométrico (mm)
0	0	0.00
5	28	0.16
10	55	0.34
15	88	0.53
20	116	0.72
25	153	0.88
30	183	1.06
35	207	1.25
40	230	1.40
45	256	1.58
50	280	1.76
55	302	1.93
60	315	2.04
65	332	2.17
70	344	2.24
75	353	2.32
80	357	2.37
85	359	2.39
90	360	2.40

Tabla 5.3.2

La figura 5.3.5 muestra la representación de los datos de la tabla 5.3.2 en color rojo. También se muestra con una línea en color negro la posición a la que debería hallarse el objeto si el sistema óptico no presentara distorsión y por tanto, las posiciones fuesen equidistantes en el plano imagen.

Con esta información se puede establecer la correspondencia entre ángulo de elevación del que procede la luz y distancia del píxel iluminado con respecto al centro del registro.

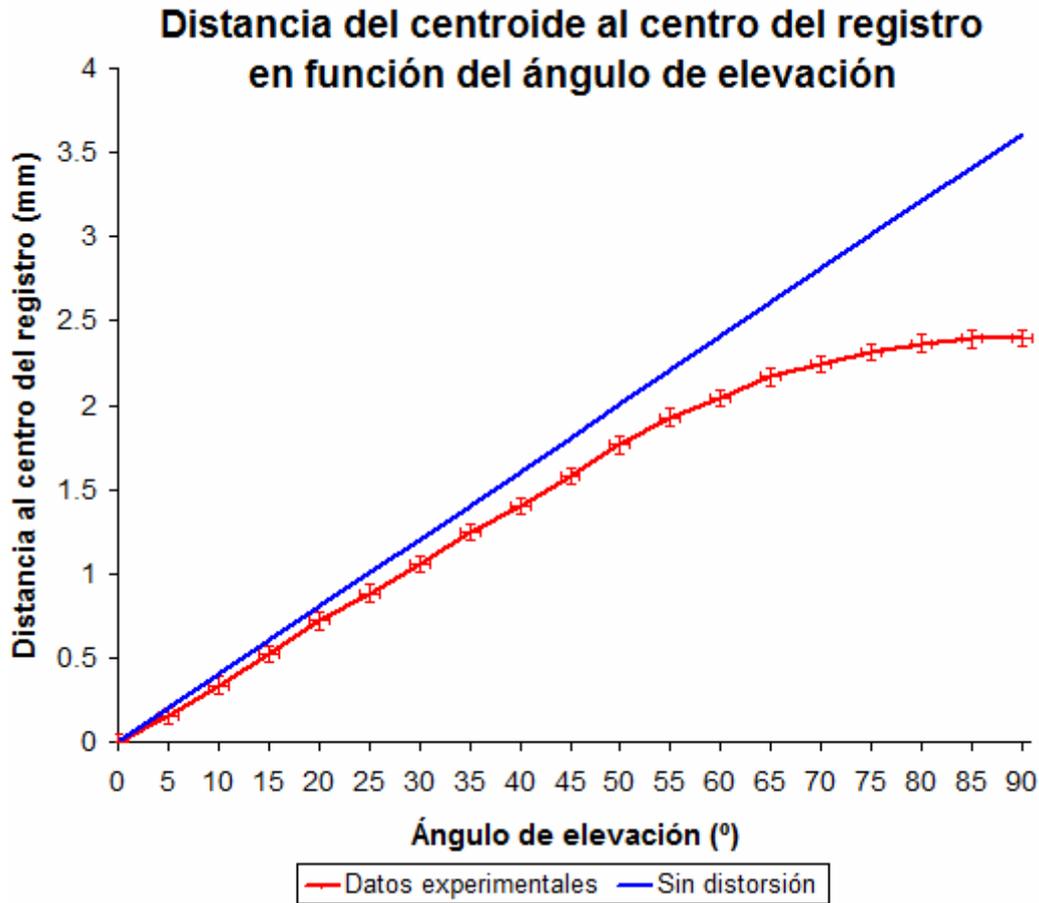


Fig 5.3.5 Posición del centroide de las imágenes presentadas en las capturas de la tabla 5.2.1. En rojo se presentan los valores experimentales, mientras que en negro se muestra la recta donde deberían hallarse si el objetivo no presentara distorsión (posición teórica). El error de los datos experimentales depende del correcto posicionamiento geométrico, cuyo error es de $\pm 1^\circ$, siendo el error en el cálculo de la posición del centroide $\pm 2\%$.

El objetivo presenta una distorsión típica de barril. Los puntos experimentales se alejan (en rojo) de las posiciones teóricas (línea negra) y el aumento lateral disminuye conforme aumenta el ángulo de elevación. El valor máximo de distancia al centro del registro es de 2.4mm, distancia correspondiente a la semidimensión de un sensor de $\frac{1}{2}$ " para el que está diseñado el objetivo gran angular.

La gráfica de la distorsión del objetivo se representa en la figura 5.3.6 (derecha), donde se muestra la captura de un patrón en forma de cuadrícula de dimensiones conocidas. La captura obtenida con el sistema óptico revela la aberración de distorsión en barril que presenta el objetivo empleado en este trabajo.

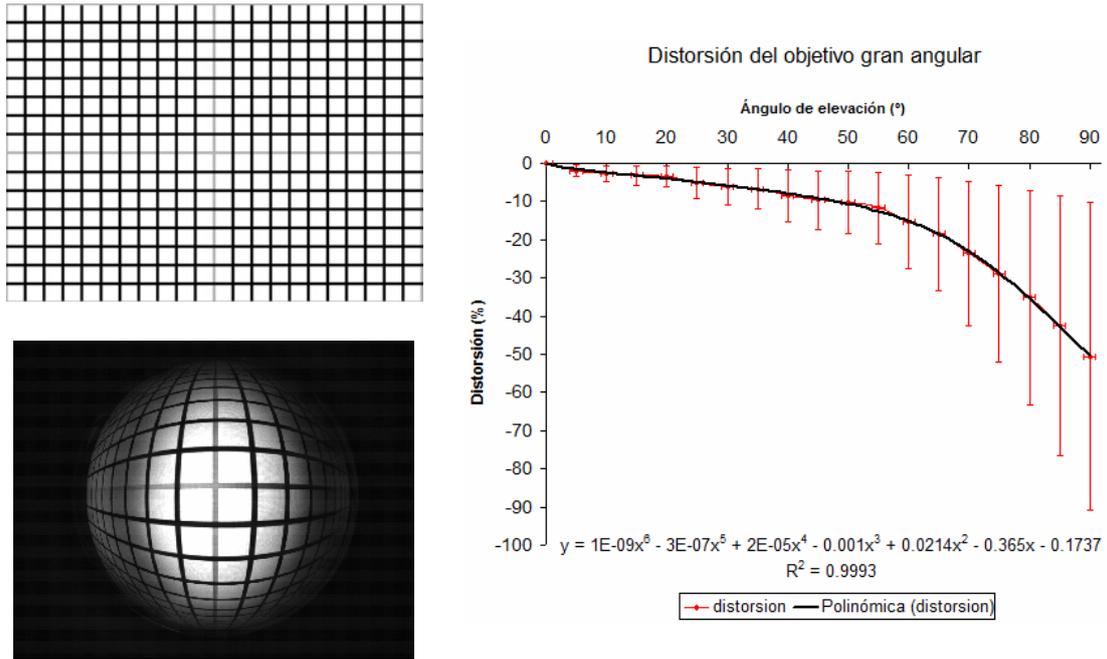


Fig 5.3.6 Captura realizada (izquierda) con el objetivo BFM2320 [Lensation 2012], donde se puede apreciar claramente la aberración de distorsión en barril que presenta este sistema óptico al tomar una captura de un patrón de una cuadrícula. Gráfica de la distorsión (derecha) obtenida a partir de los datos experimentales (rojo) y ajuste polinómico de grado 6 de los datos experimentales (negro).

5.3.3. Transmitancia

La transmitancia de un sistema óptico aporta información sobre la pérdida de flujo luminoso a lo largo del campo de visión del mismo. El análisis de la transmitancia del sistema óptico permitirá cuantificar la pérdida en iluminación que existe en todo el área de registro fotométrico. A partir de estos datos experimentales, se podrá obtener la matriz de compensación de este efecto ya estudiado en el capítulo 4 referente a la ecuación angular de correspondencia energética.

Para analizar la transmitancia del objetivo utilizado en las medidas de esta tesis, se ha empleado la configuración experimental llevada a cabo en la caracterización de la distorsión.

Cada captura ha sido filtrada mediante un offset para eliminar el ruido y posible luz parásita que no corresponde a la imagen del objeto. De esta forma se asegura que la energía contabilizada en niveles de gris para cada posición angular corresponde totalmente a la imagen del objeto iluminado en la configuración experimental.

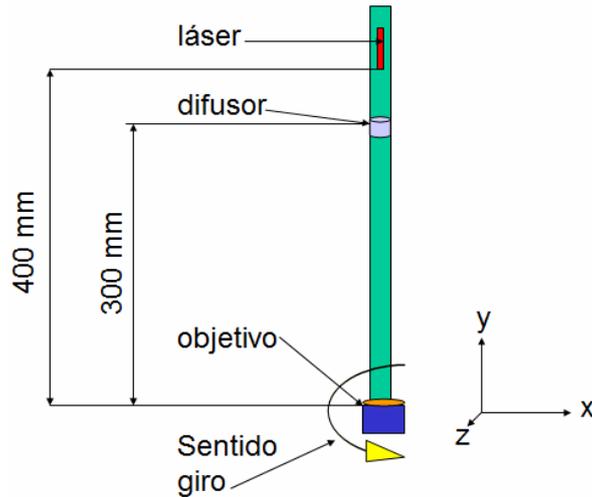


Fig. 5.3.7 Esquema de la disposición geométrica del montaje experimental para la caracterización de la transmitancia del objetivo fisheye.

A partir de las imágenes mostradas en la tabla 5.3.1, se calcula la cantidad de energía cuantificada de cada una de ellas. La cantidad de energía queda contabilizada como la suma total de niveles de gris correspondiente en cada imagen de la tabla 5.3.1. Los datos de la suma total de niveles de gris así como su valor relativo en % se muestran en la siguiente tabla:

Ángulo (°) $\pm 1^\circ$	Cantidad de energía (niveles de gris) $\pm 15\%$	Cantidad de energía relativa (%) $\pm 15\%$
0	188973	100.000
5	186824	98.863
10	182314	96.476
15	173782	91.961
20	161654	85.543
25	146540	77.545
30	130576	69.098
35	112903	59.746
40	94389	49.948
45	75923	40.177
50	58359	30.882
55	42452	22.465
60	29527	15.625
65	19019	10.064
70	10801	5.716
75	5041	2.668
80	1649	0.873
85	313	0.166
90	145	0.077

Tabla 5.3.3

Los datos sobre la cantidad de energía registrada en el sensor a través del sistema óptico gran angular en función del ángulo de elevación son representados en la figura 5.3.8.

La figura 5.3.8 muestra una gráfica donde se comprueba que el objetivo presenta una pérdida de la transmitancia en función del ángulo de elevación, con una tendencia muy similar a la de una función coseno cuarta, que también ha sido representada en negro en la misma figura, si bien la transmitancia del objetivo es mayor que la respuesta coseno a la cuarta para todos los ángulos de elevación.

Las barras de error representan en horizontal un valor de $\pm 1^\circ$, que es el error instrumental con el que se determinaron las posiciones angulares, y en vertical un valor de $\pm 15\%$, que es el error estimado en la medida de la estabilidad de la fuente luminosa.

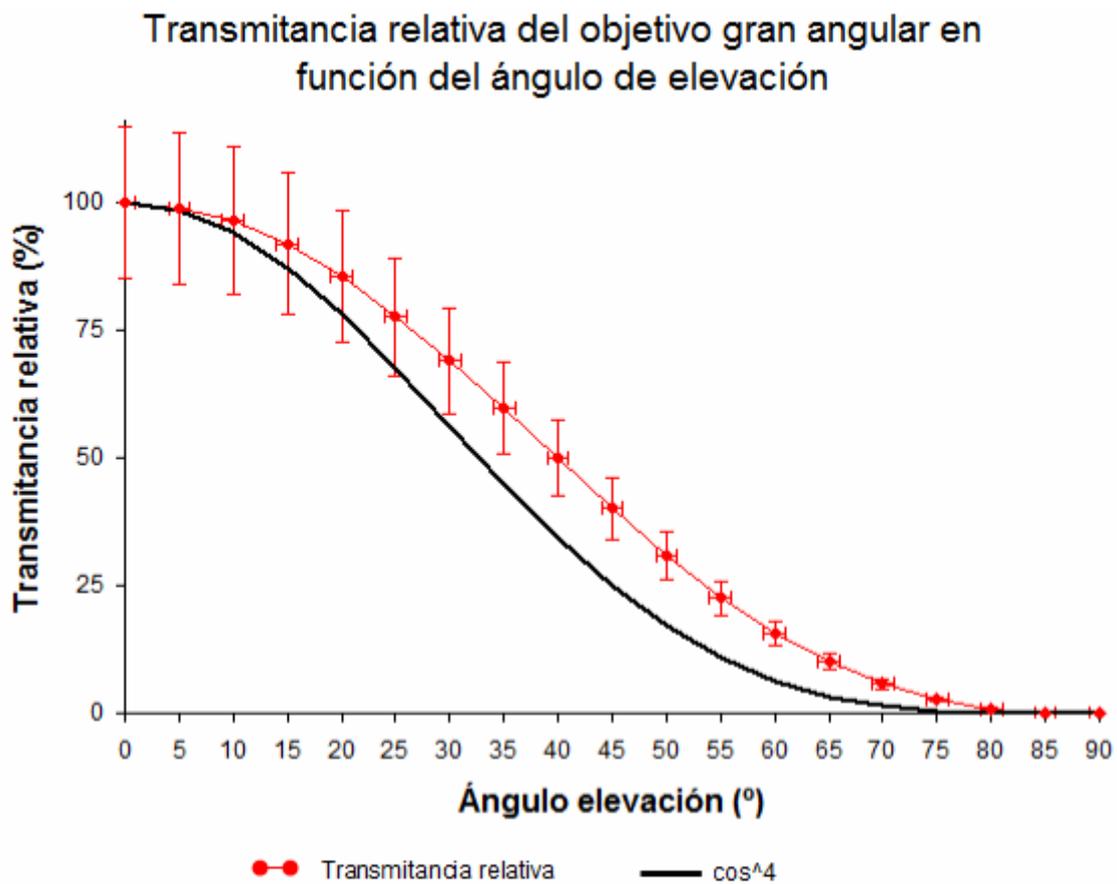


Fig 5.3.8 Cantidad de energía relativa (en rojo) del objetivo gran angular empleado en la medida fotométrica en función del ángulo de elevación. La gráfica revela una pérdida de energía muy similar a una función coseno a la cuarta (en negro). Las barras de error representan valores de $\pm 15\%$ para el error en ordenadas referente a la estabilidad de la emisión de la fuente láser y de $\pm 1^\circ$ en abcisas debido al error mecánico asociado al montaje experimental.

5.4 Algoritmo desarrollado.

El algoritmo desarrollado para llevar a cabo la medida fotométrica se presenta en la siguiente figura:

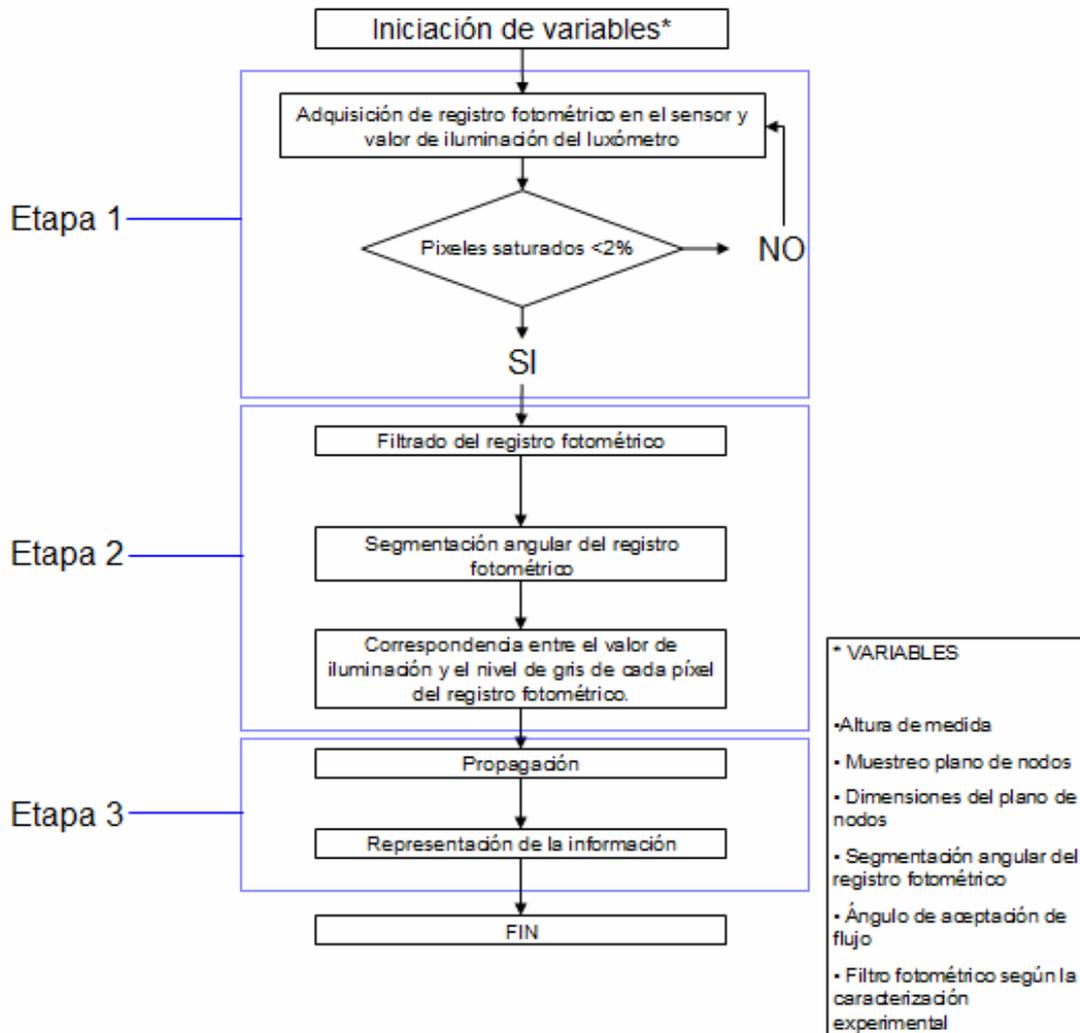


Fig. 5.4.1 Diagrama del algoritmo desarrollado para la medida de la tesis doctoral. En el algoritmo pueden distinguirse fundamentalmente tres etapas: la primera correspondiente a la medida y adquisición de los datos fotométricos del entorno de medida a estudiar, la segunda que trata del filtrado de la información y, por último, la propagación y obtención de los mapas de iluminación sobre el plano deseado.

Como se puede ver en la figura 5.4.1, el algoritmo consta de tres etapas secuenciales bien diferenciadas, cada una de las cuales genera la información que usará la siguiente etapa hasta llegar a obtener los mapas de iluminación de los entornos de medida. Para cada etapa ha sido necesario el desarrollo de programas diseñados específicamente para tratar la información con la que trabajan. Todo el desarrollo de programación referente al código, las

interfaces gráficas así como el uso de herramientas de adquisición de datos de dispositivos externos ha sido realizado bajo entorno Matlab. [MATLAB 2009]

5.4.1. Etapa de medida

Para la realización de la medida, se ha desarrollado un programa que permite obtener los registros fotométricos de la cámara y el luxómetro al mismo tiempo, con un retardo máximo en la adquisición entre los datos de la cámara y el luxómetro de 0.4s.

El programa presenta una interfaz gráfica con la cual se visualiza el registro obtenido en la cámara y la lectura del luxómetro permite representar angularmente el registro fotométrico con cuatro niveles de resolución angular distintos (Fig. 5.4.2).

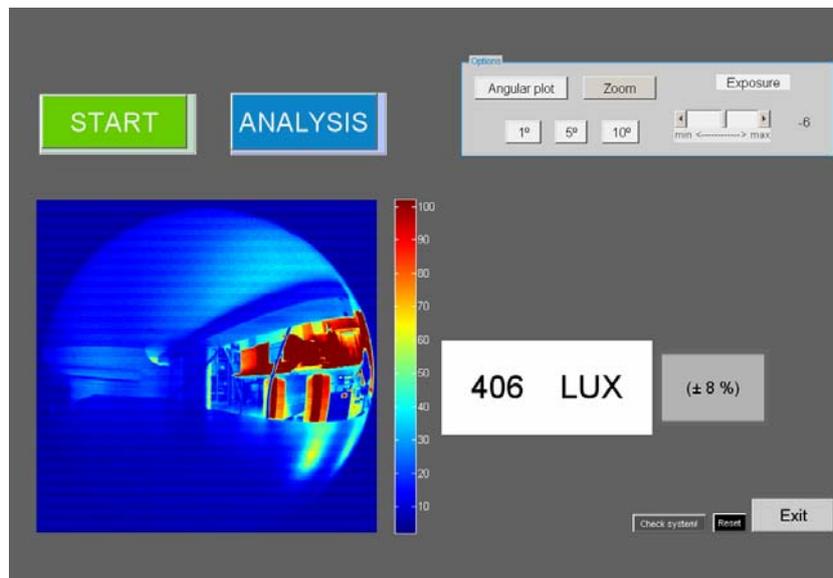
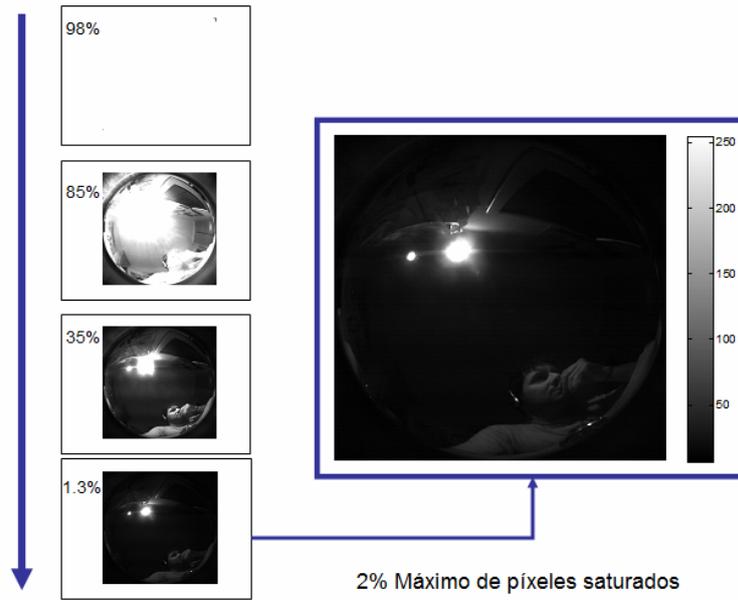


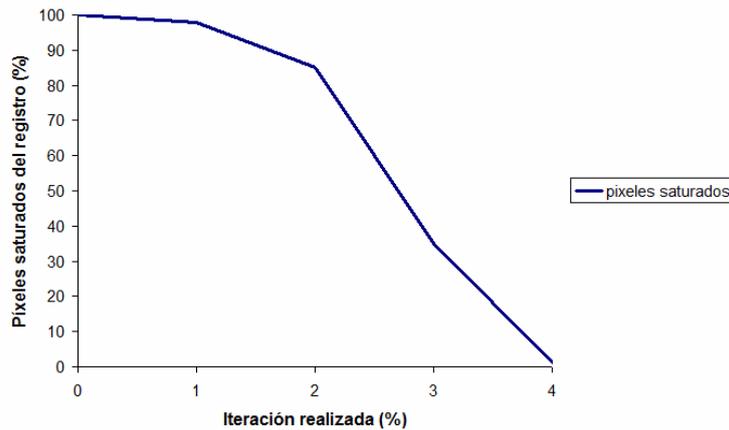
Fig 5.4.2 Interfaz gráfica del programa desarrollado para la adquisición de los datos de iluminación y el registro fotométrico proporcionado por el luxómetro y la cámara respectivamente. En esta figura se presenta una captura del laboratorio de trabajo donde se puede advertir la gran cantidad de luz incidente de las ventanas en contraste con el interior del laboratorio sobre la parte derecha del gráfico.

Además, el programa de medida selecciona automáticamente el tiempo de exposición para garantizar que dentro del círculo del registro fotométrico, no exista una cantidad superior a un 2% de píxeles saturados, en cada iteración de cambio de tiempo de exposición presenta el valor porcentual de píxeles saturados. La figura 5.4.3 muestra un ejemplo de este proceso en la adquisición del registro fotométrico.



a)

Píxeles saturados del registro en función de las iteraciones en el cambio del valor del tiempo de exposición



b)

Fig 5.4.3 Ejemplo del proceso de iteración en la adquisición del registro fotométrico mediante el cambio de tiempo de exposición (a). En cada iteración se muestra el valor de píxeles saturados en porcentaje. Una vez alcanzado un valor de píxeles saturados inferior al 2%, el proceso termina y se almacena el registro. En la figura se ha ampliado el registro que, en este caso, presenta un valor de 1.3% de píxeles saturados. Por otra parte, se representa la gráfica correspondiente al valor porcentual de la cantidad de píxeles saturados en las iteraciones realizadas (b).

El criterio de establecer un 2% como cantidad máxima relativa de píxeles saturados se realiza con el fin de optimizar el rango dinámico en cada uno de los registros fotométricos. Éste es un criterio de saturación que controla la cantidad de píxeles saturados. Los registros

fotométricos correspondientes a una serie de medidas en un entorno de medidas contienen la información asociada a las fuentes primarias y secundarias que configuran dicho entorno.

La luz procedente de las fuentes primarias como farolas u otros elementos presentan grandes valores de niveles de gris, mientras que la luz procedente de las fuentes secundarias como paredes u otros elementos presentan valores de niveles de gris muy bajos.

En el proceso de captura de los registros fotométricos se necesita establecer un criterio de captura con relación a la saturación de los píxeles que permita satisfacer dos condiciones al mismo tiempo:

1ª- La luz procedente de las fuentes primarias capturadas en los registros fotométricos no puede presentar valores de gris totalmente saturados.

2ª- La luz procedente de fuentes secundarias capturadas en los registros fotométricos no puede presentar valores de gris similares al ruido electrónico del sensor.

El objetivo del criterio de saturación es, por un lado, no perder información de las fuentes primarias sobre su directividad en el envío del flujo luminoso así como tampoco en sus zonas adyacentes. Por otro lado, se persigue no enmascarar el efecto del flujo luminoso procedente de la luz difusa procedente de fuentes secundarias.

Para plasmar el criterio de forma analítica mediante el empleo de ecuaciones matemáticas se recurre a la figura 5.4.4 para ayudar de forma gráfica a la siguiente explicación. Sea por tanto un registro fotométrico F delimitado por la línea discontinua amarilla de la siguiente figura. El registro está normalizado a 255 valores de bit para la escala de grises. Sean también dos superficies con el mismo valor de área A_p y A_s que hacen referencia a las zonas angulares que corresponden al registro del flujo luminoso procedente de una fuente primaria (foco halógeno) y una fuente secundaria (pared) respectivamente.

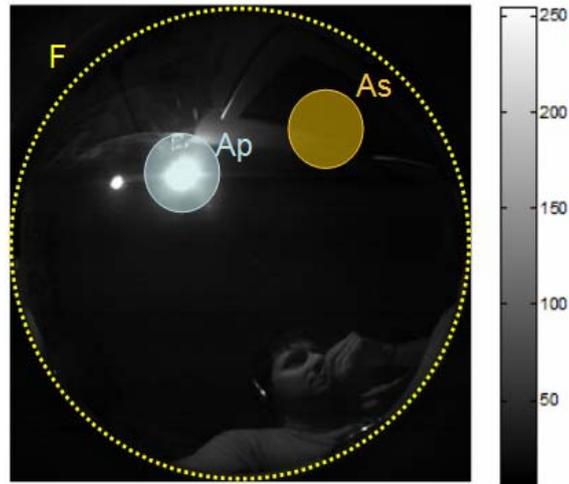


Fig 5.4.4 Ejemplo de registro fotométrico donde se han resaltado tres zonas: en línea discontinua amarilla el límite del registro fotométrico, en azul se indica una zona que corresponde al registro de flujo luminoso procedente de una fuente de luz primaria (foco halógeno) y en naranja, con el mismo valor de área, se indica una zona que corresponde al registro de flujo luminoso procedente de una fuente de luz secundaria (pared).

Las dos condiciones establecidas anteriormente se pueden escribir en forma matemática como sigue:

1ª Condición

$$\forall P_i \in A_p \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{m} < 204 \quad \text{Ecuación 5.4.1}$$

2ª Condición

$$\forall P_i \in A_s \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} > 16 \quad \text{Ecuación 5.4.2}$$

Es decir, el valor promedio de todos los píxeles (m) que engloban el área A_p (área de fuente primaria) ha de ser menor a 204, mientras que el valor promedio de todos los píxeles (n) que conforman el área A_s (área de fuente secundaria) ha de ser mayor a 16. Los valores 204 y 16 son el resultado de disminuir y aumentar un 20% los valores de saturación y ruido que presenta el sensor CMOS, una cantidad relativa que está directamente relacionada con la linealidad del sensor, pues para cada tiempo de exposición, el 20% de los puntos experimentales debe ser eliminado para establecer un correcto comportamiento lineal.

Se ha realizado un experimento donde se ha calculado el valor promedio de los píxeles que configuran las áreas Ap y As de un registro fotométrico en función de los píxeles saturados. El experimento se ha realizado para distintos tipos de registros tanto en laboratorio como en entornos de medida reales como una instalación de alumbrado público. La siguiente tabla muestra los valores promedio obtenidos.

Píxeles saturados (%)	Valor promedio de píxeles en Ap	Valor promedio de píxeles en As	Máximo valor promedio permitido en Ap	Mínimo valor promedio permitido en As
0	160	9	204	16
2	185	39	204	16
35	226	64	204	16
85	243	150	204	16
95	255	240	204	16
100	255	255	204	16

Tabla 5.4.1

La tabla 5.4.1 muestra en las columnas segunda y tercera los valores promedio de las áreas de los registros fotométricos que corresponden a las zonas de captación de flujo luminoso de fuentes primarias y secundarias respectivamente. Para una cantidad de píxeles saturados correspondiente a un 2% se cumplen las dos condiciones establecidas anteriormente. Si se representa esta tabla de datos experimentales de forma gráfica, se obtiene la figura 5.4.5:

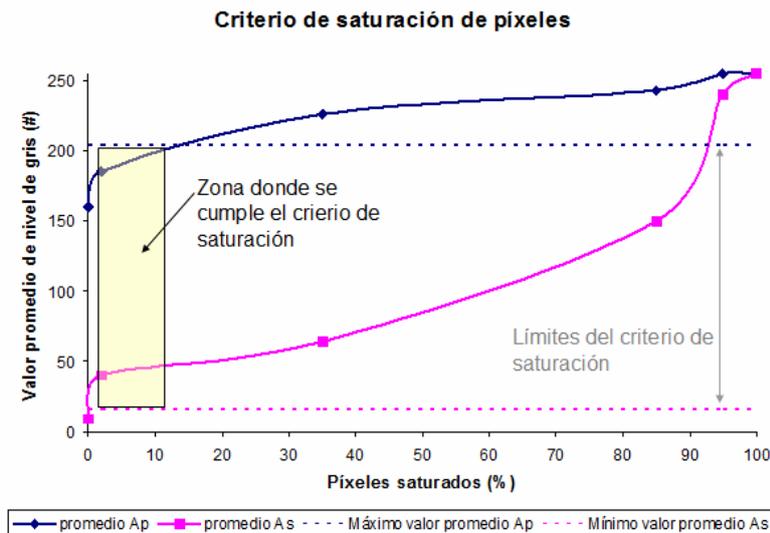


Fig 5.4.5 Representación gráfica de los datos experimentales correspondientes al análisis del criterio de píxeles saturados en el sensor. Las líneas horizontales muestran los límites donde deben encontrarse las curvas de valor promedio de nivel de gris para que la información en las áreas Ap y As contribuya eficientemente a la detección del flujo luminoso en cada punto.

La figura 5.4.5 muestra los límites dentro de los cuales se considera, según el criterio de saturación, que los registros fotométricos aportan una información adecuada de las zonas con altas y bajas cantidades de emisión de flujo luminoso de forma simultánea.

Según la gráfica, existe una zona que corresponde a valores de cantidad de píxeles saturados entre un 2% y 15% en la que ambas curvas de valores promedio cumplen con las condiciones del criterio de saturación.

5.4.2. Etapa de filtrado

Una vez realizadas todas las medidas correspondientes a la iluminación y sus registros fotométricos correspondientes, un nuevo programa lee todos los registros adquiridos y los filtra según los parámetros obtenidos en la caracterización experimental explicada en los apartados anteriores.

La etapa de filtrado tiene por objetivo obtener una función que pese cada uno de los píxeles de los registros fotométricos obtenidos en cada punto de medida. Esta función es el filtro fotométrico y dependen de las propiedades del sistema óptico. Dicha función dará lugar a una matriz cuadrada a partir de la información generada en el apartado de análisis de la transmitancia del objetivo gran angular. La matriz presentará iguales dimensiones a la de los registros fotométricos para establecer un valor adecuado a cada píxel de nivel de gris de acuerdo con su localización geométrica en el registro.

El flujo incidente sobre un píxel se describe, a partir de la ecuación 4.2.22, mediante la ecuación 5.4.3:

$$\phi(\varepsilon, \alpha) = \Phi(\varepsilon)\phi(0,0) \quad \text{Ecuación 5.4.3}$$

Donde:

$\phi(\varepsilon, \alpha)$ es el flujo incidente en un píxel para una dirección (ε, α) .

$\Phi(\varepsilon)$ es la función de transferencia del sistema óptico.

$\phi(0,0)$ es el flujo incidente en un píxel para la dirección $(0,0)$.

La función de transferencia del sistema óptico se escribe según la ecuación 5.4.4:

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{\pi L S_{\text{pixel}}}{4} \left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \cos^3(\varepsilon)}{f \#^2(\varepsilon)} \quad \text{Ecuación 5.4.4}$$

Donde:

$\frac{\pi L S_{\text{pixel}}}{4}$ es el término asociado al objeto.

$\left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i \right) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE}) \cos^3(\varepsilon)}{f \#^2(\varepsilon)}$ es el término que depende de

características intrínsecas del sistema óptico empleado.

A partir de la información de la tabla 5.4.3, y empleando la función de transferencia, se puede parametrizar la función que definirá al filtro fotométrico. El filtro fotométrico es una función que ha de compensar las pérdidas de energía del flujo luminoso a través del sistema óptico y que también tiene en cuenta aspectos como el área efectiva que subtiene cada píxel con respecto a la pupila de salida del sistema óptico, de aquí, que el parámetro coseno cubo también esté presente.

El filtro fotométrico es por tanto, el producto de dos funciones. Por un lado, la función coseno cubo y por otro, una función que compense la pérdida de flujo luminoso a través del sistema, a esta función se le denomina factor de compensación.

$$\Psi(\varepsilon) = T(\varepsilon) \cos^3(\varepsilon) \quad \text{Ecuación 5.4.5}$$

Donde:

$\Psi(\varepsilon)$ es el filtro fotométrico.

$T(\varepsilon)$ es el factor de compensación de las pérdidas introducidas por el sistema.

$\cos^3(\varepsilon)$ es el factor coseno cubo.

El factor de compensación, se define como la razón entre el valor de niveles de gris a 0 grados y el valor de niveles de gris para un ángulo ε .

$$T(\varepsilon) = \frac{\Phi(0)}{\Phi(\varepsilon)} = \frac{t_0 \frac{\cos(-\varepsilon_{PE})}{f\#^2(0)}}{\left(\sum_{i=0}^n t_i \cdot \varepsilon^i\right) \frac{\cos(\varepsilon - \varepsilon_{PE})}{f\#^2(\varepsilon)} \cos^3(\varepsilon)} \quad \text{Ecuación 5.4.6}$$

Por tanto, el flujo incidente sobre un píxel, debe ser pesado por el filtro fotométrico para cada dirección de incidencia.

$$\phi'(\varepsilon, \alpha) = \Psi(\varepsilon) \phi(\varepsilon, \alpha) \quad \text{Ecuación 5.4.7}$$

En la tabla 5.4.2 se muestran todos los datos para calcular el filtro fotométrico.

Ángulo (°)	Cantidad de energía (niveles de gris)	Cantidad de energía relativa (%)	Factor de compensación T(ε)	cos ³ (ε)	Filtro fotométrico Ψ(ε)
±1°	± 15%	± 15%	± 15%	± 0.001	± 15%
0	188973	100.000	1.000	1.000	1.000
5	186824	98.863	1.012	0.989	1.000
10	182314	96.476	1.037	0.955	0.990
15	173782	91.961	1.087	0.901	0.980
20	161654	85.543	1.169	0.830	0.970
25	146540	77.545	1.290	0.744	0.960
30	130576	69.098	1.447	0.650	0.940
35	112903	59.746	1.674	0.550	0.920
40	94389	49.948	2.002	0.450	0.900
45	75923	40.177	2.489	0.354	0.880
50	58359	30.882	3.238	0.266	0.860
55	42452	22.465	4.451	0.189	0.840
60	29527	15.625	6.400	0.125	0.800
65	19019	10.064	9.936	0.076	0.750
70	10801	5.716	17.496	0.040	0.700
75	5041	2.668	37.487	0.017	0.649
80	1649	0.873	114.599	0.005	0.596
85	313	0.166	603.748	0.001	0.423
90	145	0.077	1303.262	0.000	0.000

Tabla 5.4.2

Las tres primeras columnas de la tabla anterior son idénticas a las que ya se han mostrado en el análisis de la transmitancia del objetivo. La cuarta columna refleja el resultado de dividir la cantidad de energía relativa máxima (0°) entre la energía relativa para cada ángulo de elevación. La quinta columna presenta los valores numéricos correspondientes a la función coseno cubo y, finalmente, la sexta columna representa los valores correspondientes al filtro fotométrico. Estos valores son el resultado de multiplicar los valores de la columna cuarta y quinta entre sí para cada ángulo de elevación.

El filtro presenta simetría de revolución en torno al eje vertical z. Si se representan unidimensionalmente las columnas 4, 5 y 6 en función del ángulo de elevación, se obtiene la gráfica 5.4.6.

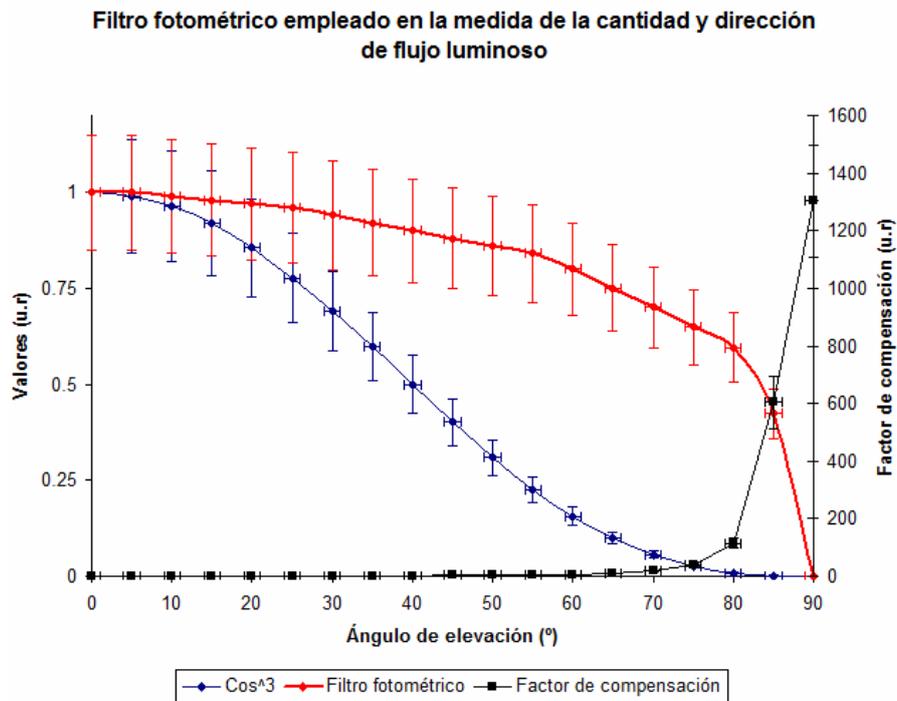


Fig 5.4.6 Representación unidimensional del filtro fotométrico empleado en la segunda etapa del algoritmo. El filtro pesa energéticamente de forma distinta cada píxel, haciendo nulos aquellos valores que equivalen a 90° de ángulo de elevación de la luz incidente sobre la cámara. El peso de los píxeles va aumentado siendo máximo en el centro. La figura representa el filtro normalizado a la unidad. También se representan los valores del coseno cubo y del factor de compensación que deben tenerse en cuenta para calcular el flujo incidente sobre el sistema óptico. El factor de compensación está representado en referencia a los valores del eje y secundario (derecha).

Si la curva roja de la figura 5.4.6 se rota alrededor del eje vertical, entonces se tiene la superficie o representación bidimensional del filtro fotométrico (figura 5.4.7 (a)). La proyección

de la superficie sobre el plano horizontal muestra el aspecto de la matriz que representa el filtro fotométrico aplicado a los registros capturados por la cámara sobre el plano del sensor CMOS. (Figura 5.4.7 (b))

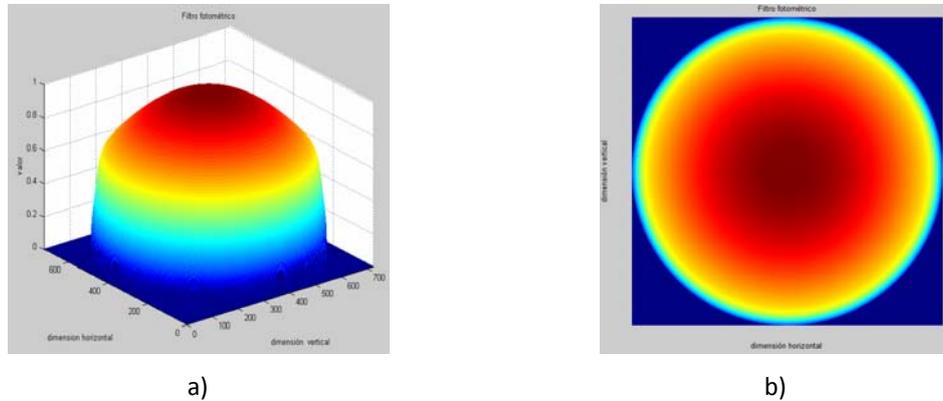


Fig 5.4.7 Representación tridimensional (a) y representación bidimensional (b) del filtro fotométrico empleado en la segunda etapa del algoritmo. El filtro pesa de forma distinta cada píxel haciendo nulos aquellos valores que equivalen a 90° de ángulo de elevación de la luz incidente sobre la cámara, el peso de los píxeles va aumentando siendo máximo en el centro. La figura representa el filtro normalizado a la unidad.

Numéricamente, el filtro puede ser descrito como una matriz cuadrada de dimensión 721×721 píxeles, las dimensiones del filtro y de los registros fotométricos son iguales. El proceso de filtrado consiste en la multiplicación de cada registro por la matriz que representa el filtro.

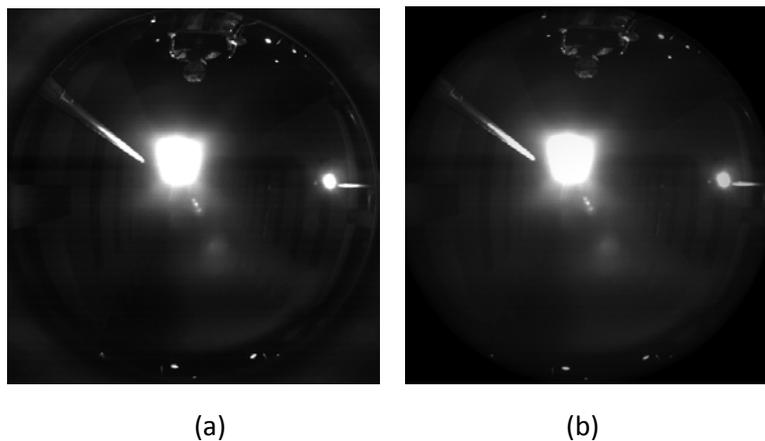


Figura 5.4.8 Registro original obtenido por la cámara tras el proceso de cálculo de píxeles saturados (a) y registro obtenido tras el proceso de filtrado (b). En la figura (b) se ve como el efecto del filtro proporciona un mayor peso a los píxeles centrales del registro fotométrico, mientras que las zonas más próximas al borde del registro presentan un menor peso en los valores de gris calculados.

Una vez que los registros son filtrados, se les resta a cada uno de ellos una nueva matriz que contiene el efecto del ruido propio (ruido patrón) del sensor, y a continuación se realiza una nueva operación de filtrado para eliminar el efecto de ruido en bandas.

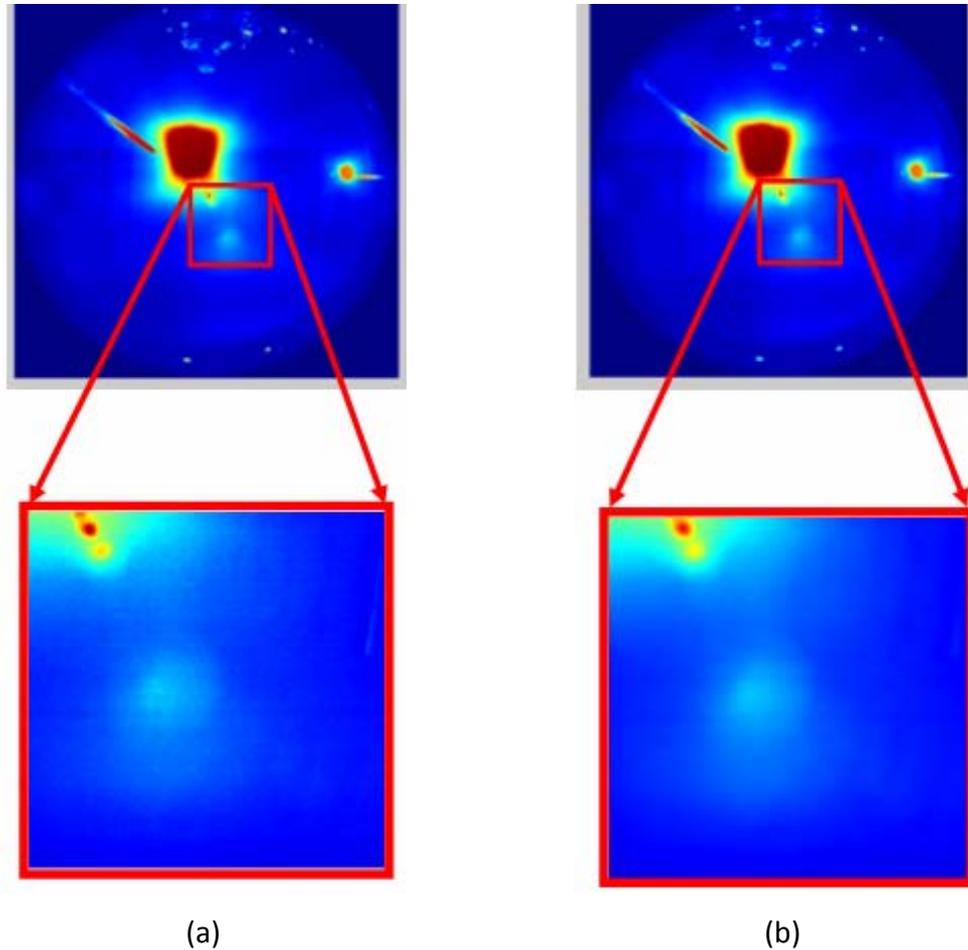


Fig 5.4.9 Detalle del registro filtrado (a) y detalle del mismo registro filtrado tratado con la segunda fase de filtrado correspondiente al tratamiento del ruido en bandas y aleatorio (b), donde se puede apreciar como dichos efectos han sido minimizados.

5.4.3. Etapa de propagación y representación.

La tercera etapa es la más importante de las tres contempladas en el algoritmo, puesto que en ella recae la idea de hacer uso de un sistema óptico gran angular para ser utilizado como un dispositivo fotométrico capaz de obtener la cantidad y dirección de la luz incidente en un punto de medida.

Antes de realizar la propagación en sí, un nuevo programa ha sido diseñado para segmentar angularmente, el registro fotométrico para que, posteriormente, el flujo incidente

en cada zona sea propagado desde el plano de nodos a la porción de área correspondiente en el plano de medida.

Para calcular las zonas de cada registro que corresponden a cada porción de área sobre el plano de medida, es necesario conocer la altura del plano de nodos, el muestreo del plano de medida y el ángulo máximo de trabajo considerado en la captación del flujo.

La fig 5.4.10 representa un esquema donde pueden identificarse los parámetros mencionados anteriormente. El círculo m representa un punto de medida sobre el plano de nodos Pn . El plano de medida es notado como $P0$. las cuadrículas en las que ha quedado muestreado el plano de medida son cuadriláteros regulares de dimensión L , por tanto $x = y = L$. En función de la dimensión s del plano de medida y la altura d del plano de nodos, se determinará el ángulo máximo de trabajo ε que es aquel a partir del cual la luz registrada será propagada fuera del plano de medida para cada registro.

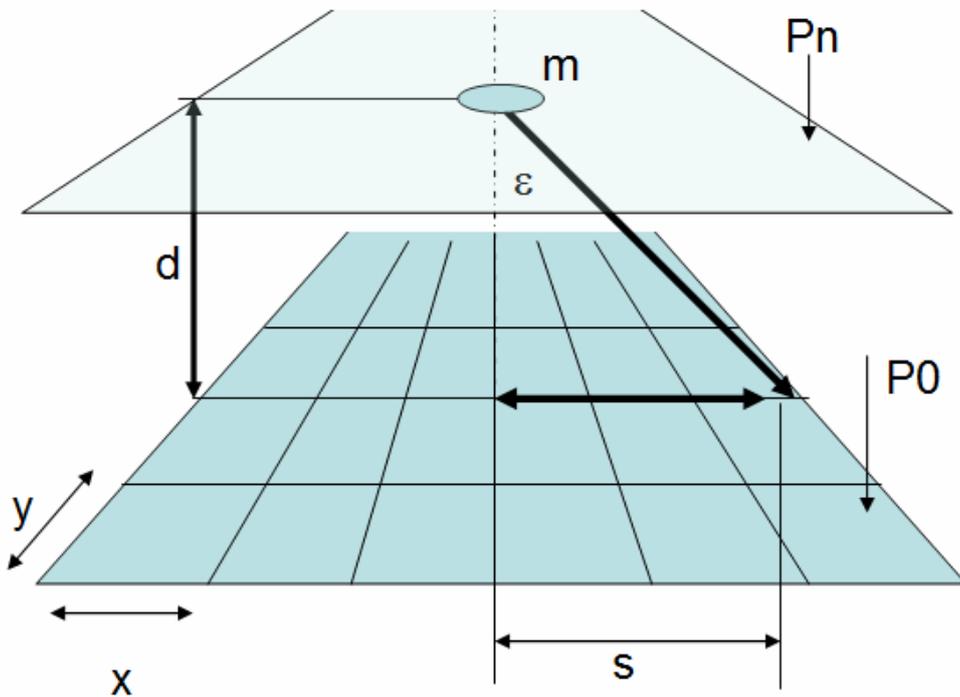


Fig 5.4.10 Esquema de representación de los parámetros necesarios para el desarrollo del algoritmo de propagación del flujo luminoso entre el plano de nodos y el plano de medida.

Si se representa bidimensionalmente este esquema, se tiene entonces:

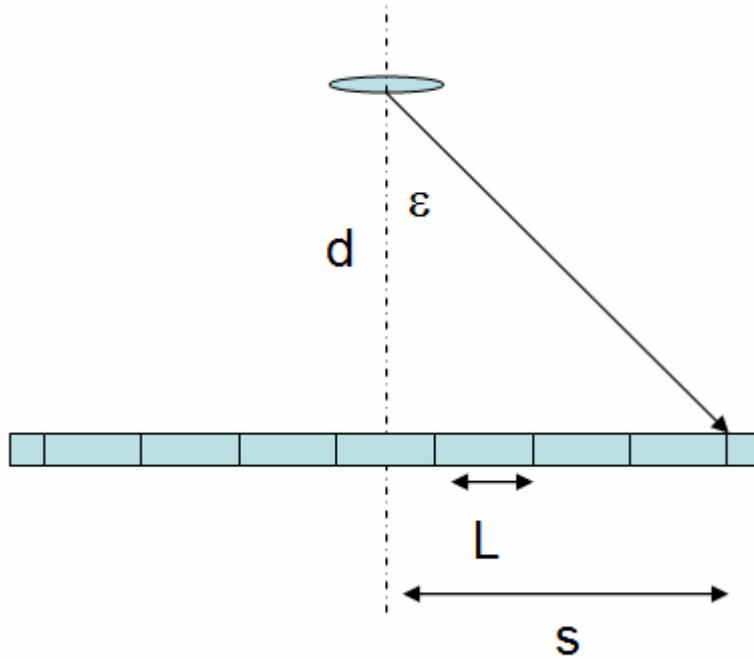


Fig 5.4.11 Esquema bidimensional de representación de los parámetros necesarios para el desarrollo del algoritmo de propagación del flujo luminoso entre el plano de nodos y el plano de medida.

El programa de cómputo de las zonas del registro, de aquí en adelante celdas angulares, asignadas a cada cuadrícula en el plano de medida se determinan mediante el siguiente razonamiento:

En función de la anchura del plano de medida y la altura del plano de nodos, se calcula el ángulo máximo de captación de flujo luminoso por parte del objetivo gran angular:

$$\varepsilon = \arctan \left(\frac{s}{d} \right) \quad \text{Ecuación 5.4.8}$$

Por otra parte, dividiendo la anchura del plano de medida entre la dimensión de las cuadrículas del muestro del mismo plano, se obtiene el número de celdas que deberán calcularse a lo largo de la dirección paralela a s.

$$n = \frac{2s}{L} \quad \text{Ecuación 5.4.9}$$

Dado que el sistema tiene simetría en torno al eje z, el número de celdas n en la dirección x será el mismo que en la dirección y, por tanto, el número total de celdas angulares

que deberán ser consideradas en los registros fotométricos quedan cuantificadas por la expresión:

$$N = \left(\frac{n}{2} + 1 \right)^2 = \left(\frac{s}{L} + 1 \right)^2 = \left(\frac{d \tan(\varepsilon)}{2L} + 1 \right)^2 \quad \text{Ecuación 5.4.10}$$

Cada una de las N celdas angulares presentará unos píxeles con un cierto valor de nivel de gris, para cada celda se calcula su nivel total de gris. Se calcula su porcentaje relativo al total calculado dentro del máximo ángulo de trabajo de captación de flujo luminoso. El flujo luminoso contenido en cada celda angular es propagado a las cuadrículas del plano de medida como se ve en la siguiente figura:

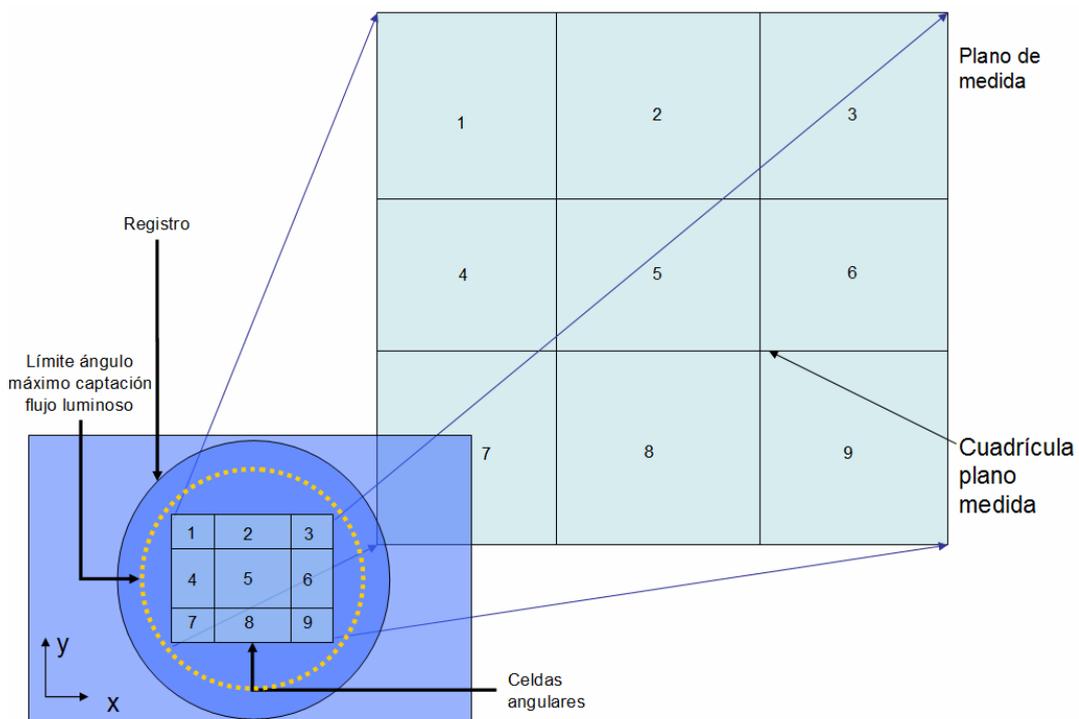


Fig 5.4.12 Esquema de propagación del flujo luminoso entre las celdas angulares de un registro fotométrico y la cuadrícula del plano de medida. Cada celda angular tiene fijada una zona delimitada angularmente por los límites de muestreo de cada una de las cuadrículas sobre el plano de medida.

El programa establece, en función de los parámetros de medida, los ángulos a los que son vistas cada una de las cuadrículas del plano de medida desde cada uno de los puntos de medida sobre el plano de nodos. El programa lee la información de cada celda angular y asigna el flujo a su cuadrícula correspondiente.

La k-ésima cuadrícula es aquella cuyas dimensiones se encuentran acotadas por los límites establecidos a partir de la siguiente expresión para el plano x-y.

$$N_{k=1\dots N} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{eje } x \left\{ \begin{array}{l} d \cdot \tan(\varepsilon) \cdot \sin(\alpha) < \frac{d \tan(\varepsilon)}{L} + \frac{1}{2} - (k-1) \\ d \cdot \tan(\varepsilon) \cdot \sin(\alpha) > \frac{d \tan(\varepsilon)}{L} - \frac{1}{2} - (k-1) \end{array} \right. \\ \text{eje } y \left\{ \begin{array}{l} d \cdot \tan(\varepsilon) \cdot \cos(\alpha) < \frac{d \tan(\varepsilon)}{L} + \frac{1}{2} - (q-1) \\ d \cdot \tan(\varepsilon) \cdot \cos(\alpha) > \frac{d \tan(\varepsilon)}{L} - \frac{1}{2} - (q-1) \end{array} \right. \Leftrightarrow \frac{d \tan(\varepsilon)}{L} - (k-1) < \frac{s}{L} \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 5.4.11}$$

donde $q = k$

Queda de este modo establecida toda la información geométrica acerca de los parámetros de medida, calculadas las celdas angulares y asignada la correspondencia geométrica entre las celdas angulares de los registros fotométricos y las cuadrículas del plano de medida. El algoritmo de propagación del flujo luminoso dispone de todos los datos para conjugar la información del flujo luminoso propagado desde cada uno de los registros fotométricos situados en los puntos de medida del plano de nodos.

De esta forma, se puede generar, haciendo actuar de forma cooperativa a los nodos, los mapas de iluminación de los entornos de medida. Aunque por simplicidad solo se representa para un registro fotométrico, la figura 5.4.13 muestra un esquema más detallado de cómo el flujo luminoso albergado en las celdas angulares es propagado desde el plano de nodos al plano de medida.

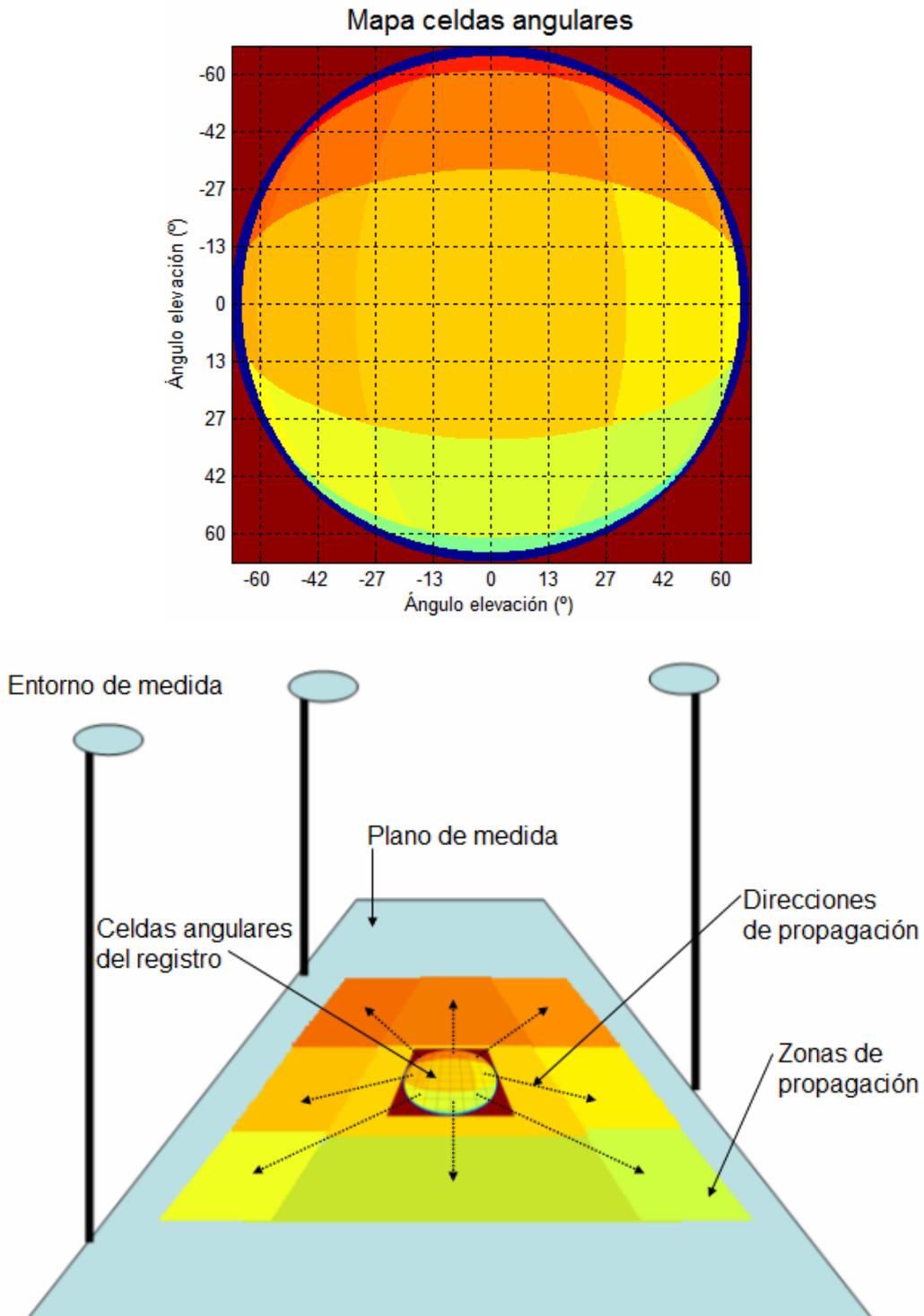


Fig 5.4.13 Esquema explicativo de la propagación del flujo luminoso calculado en las celdas angulares de un registro fotométrico. Por simplicidad de la figura, solo se muestra el esquema para un solo registro fotométrico. Las celdas que lo configuran corresponden a una altura de medida de 0.2m, un muestreo de 0.25x0.25m y un ángulo de aceptación de de flujo de 70°. El mapa de celdas y la cuadrícula se ha realizado en color para visualizar mejor la correspondencia geométrica

El mapa angular representado en las figuras anteriores es generado con la ayuda de interfaz gráfica basada en el algoritmo que emplea los cálculos desarrollados anteriormente durante este apartado. La interfaz, como se puede ver en la figura 5.4.14, presenta un entorno simple con las entradas de los parámetros de medida como información fundamental, un cuadro de texto donde se indica el número de celdas angulares a calcular, una zona designada a la representación de las mismas y finalmente un botón que genera la información y la guarda a disco.

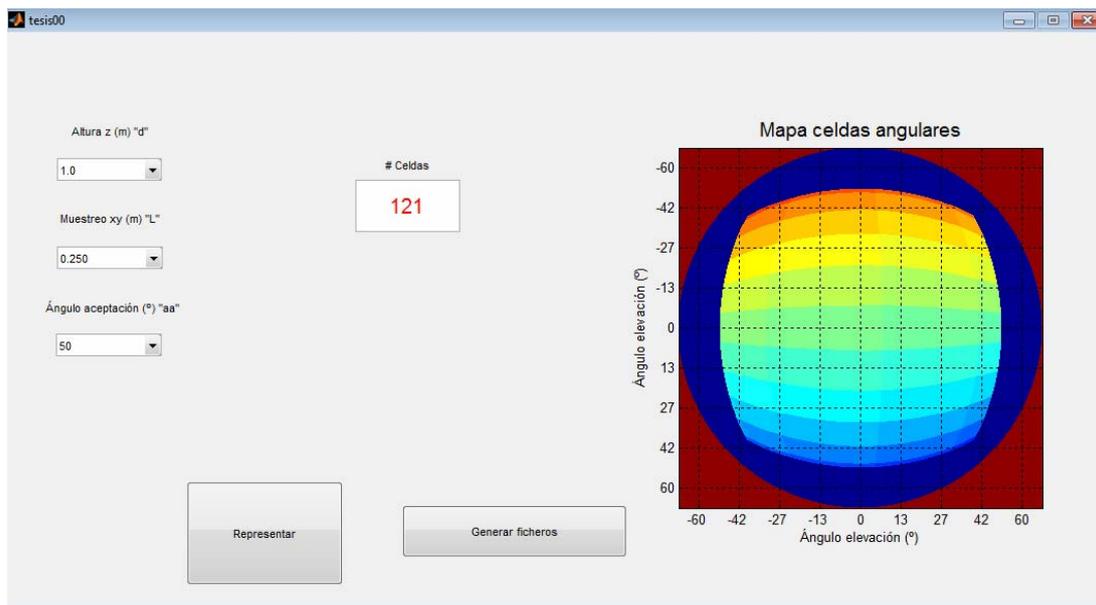


Fig 5.4.14 Representación gráfica de las celdas angulares calculadas por el programa de segmentación angular que identifica geoméricamente la correspondencia entre las celdas angulares y las zonas de propagación en el plano de medida. La zona azul oscuro muestra el área del registro que no es tomada en cuenta en el cálculo de la propagación. Las diferentes zonas coloreadas hacen referencia a cada una de las celdas angulares que serán propagadas al plano de medida. [MATLAB 2011]

Es interesante ver cómo aumenta el número de celdas angulares en función de los parámetros de medida. La gráfica 5.4.15 muestra, en función del ángulo máximo de aceptación de flujo luminoso, cómo aumenta el número de celdas para dos alturas del plano de nodos, a 0.2 m y a 1.0 m del plano de medida.

Así como el número de celdas crece exponencialmente con el ángulo de aceptación de flujo luminoso, también lo hace el tiempo de cómputo. La gráfica 5.4.16 muestra el tiempo empleado para un número total de 100 registros, en función nuevamente del ángulo de elevación y donde también se ha supuesto un muestreo de $L=0.25\text{m}$. El tiempo de cálculo

aumenta de forma exponencial por lo que para cada entorno de medida se debe valorar qué ángulo de aceptación de flujo luminoso debe ser tenido en cuenta estableciendo un equilibrio entre tiempo de cómputo y error cometido.

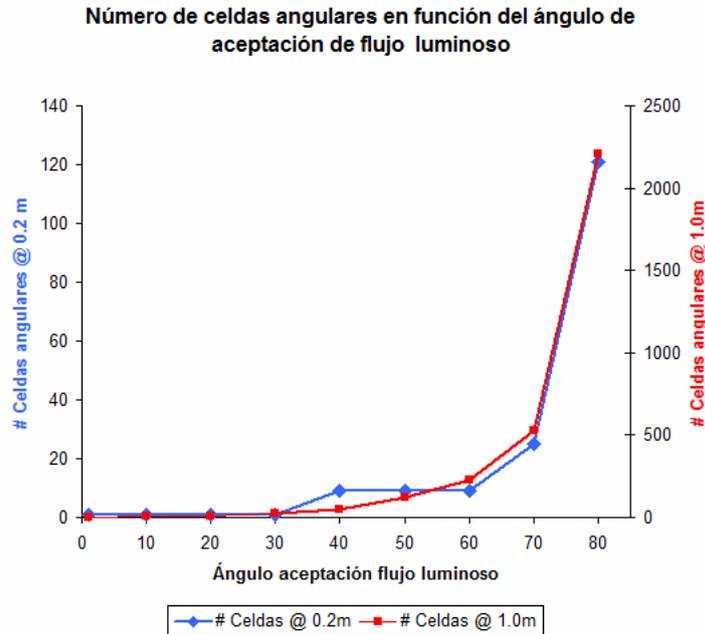


Fig 5.4.15 Gráfica correspondiente al número de celdas angulares que contiene un registro fotométrico en función del ángulo de aceptación de flujo luminoso y la altura de medida. Tanto para la curva azul como para la roja, se ha supuesto un muestreo del plano de medida y nodos igual a $L=0.25m$.

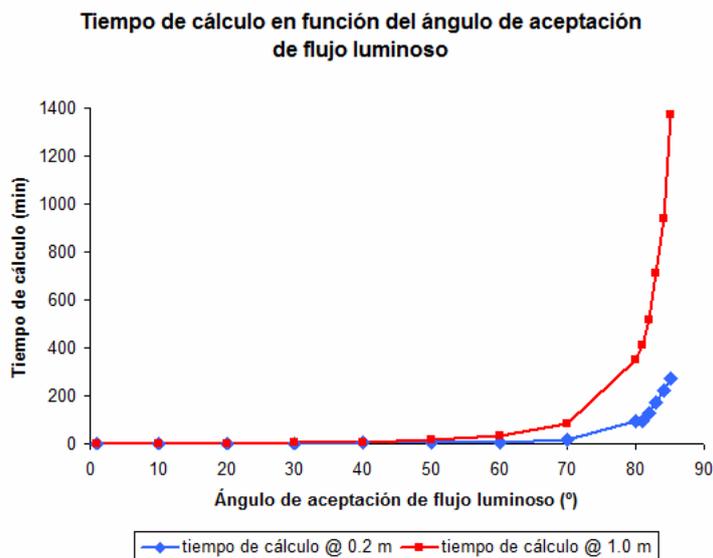


Fig 5.4.16 Gráfica correspondiente al tiempo de cálculo necesario para realizar todo el procesado de información de 100 registros fotométricos en función del ángulo de aceptación de flujo luminoso para dos alturas del plano de nodos.

Obtenidas las celdas angulares, el algoritmo avanza hacia la etapa de propagación del flujo luminoso cuantificado en cada una de las celdas angulares de los registros el porcentaje relativo que albergan respecto del total incidente en cada punto de medida.

Como se vio en el capítulo 4, a partir de la lectura del luxómetro y conocido el área sobre el cual dicha lectura se considera constante, se puede obtener el flujo luminoso incidente. El valor del flujo luminoso es entonces igualado a la suma total de niveles de gris de cada registro.

$$\phi = E(x_r, y_r) \cdot S = \sum_{n=1}^p g_i \quad \text{Ecuación 5.4.11}$$

Donde g_i representa el nivel de gris de cada píxel y p es el número total de píxeles que se encuentran en el registro de la distribución geométrica de la iluminación. Por tanto, el porcentaje del flujo luminoso para cada celda angular es finalmente:

$$\phi_{celda} = \frac{\sum_{n=1}^m g_i}{\sum_{n=1}^p g_i} \times 100 \quad / \quad m \leq p \quad \text{Ecuación 5.4.12}$$

Como los muestreos del plano de nodos y el plano de la medida son conocidos, así como la correspondencia geométrica entre las celdas angulares y las áreas a las que corresponden sobre el plano de medida, se puede obtener finalmente la iluminación en el plano de medida.

$$E_{cuadrícula} = \frac{\sum_1^r \sum_1^c \phi_c^r}{L^2} \quad \text{Ecuación 5.4.13}$$

Donde r representa el número de registros y c el número de celdas que contribuyen a la iluminación de la misma cuadrícula sobre el plano de medida con área L^2 . La operación de propagación es realizada para todos los registros fotométricos, de forma que existirán zonas comunes de propagación del flujo luminoso para celdas angulares de distintos registros fotométricos. Dichas zonas comunes vienen impuestas en función de los valores de los parámetros de medida. Como ya se estableció en el capítulo 4, la información de cada punto

de medida cooperará con la de los puntos adyacentes para proporcionar los mapas de iluminación sobre el plano de medida:



Fig 5.4.17 Representación virtual de un mapa de iluminación en la calle Miquel Vives de Terrassa. La imagen muestra cómo las fuentes de luz producen una iluminación con poca uniformidad a lo largo de toda la calzada medida.

En el próximo capítulo concerniente a los resultados experimentales, se expondrán los entornos de medida y se mostrará nuevamente cómo trabaja el algoritmo desarrollado a partir de la información experimental obtenida con los dispositivos caracterizados y comentados en este capítulo.

Capítulo 6

Resultados experimentales

Explicadas la estrategia de medida, la caracterización de los dispositivos asociados a la misma y, finalmente, el algoritmo de propagación del flujo luminoso, se presenta a continuación el capítulo de resultados experimentales.

Los resultados experimentales de esta tesis doctoral están divididos en dos partes. La primera hace referencia a los resultados experimentales obtenidos en el entorno de medida de laboratorio, la segunda hace referencia a los resultados obtenidos en un espacio público, una calle de la ciudad de Terrassa donde la casuística de medida adquiere mayor dificultad.

Tanto en la primera como en la segunda parte, se analizan las condiciones de trabajo. Los resultados de las distribuciones de iluminación calculadas se comparan con una medida directa sobre el plano de medida, que es aquel que sirve como plano de referencia. Los planos de interés en las medidas experimentales son notados como P0 el plano de referencia, P02 es el plano situado a 0.2m del plano de referencia tal y como marca la normativa europea y, finalmente, P10 es un plano situado a 1.0m del plano de referencia.

En el entorno de laboratorio, se ha realizado la propagación del flujo luminoso desde P02 a P0 con el objetivo de validar la estrategia de medida. En el entorno de medida de calle, las medidas experimentales se han ampliado, realizando la propagación desde los planos P02 y P10 a P0. Finalmente, en cada una de las partes se incluye un apartado de discusión sobre los resultados obtenidos.

6.1 Resultados experimentales en laboratorio.

El objetivo de las medidas experimentales en laboratorio es comprobar en un entorno de medida controlado el algoritmo de propagación y la estrategia de medida presentada en el capítulo 4, tomando como referencia las indicaciones que se contemplan en la normativa europea. [UNE-EN 13201-4]

Las condiciones geométricas son las representadas en la figura 6.1.1. Las medidas experimentales realizadas en P0 son una serie de medidas de referencia. En base a ellas se podrá comparar los resultados proporcionados por la propagación del flujo luminoso.

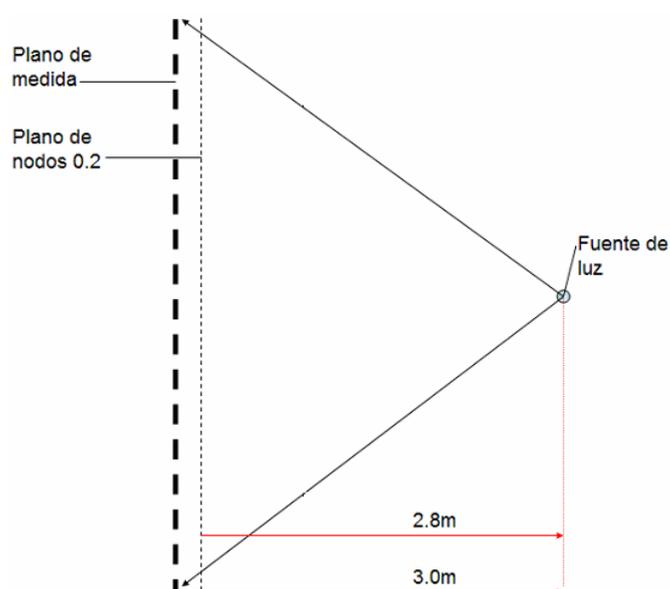


Fig. 6.1.1 Esquema 2D de la medida experimental realizada en laboratorio. El plano donde se desea conocer la iluminación es el plano de medida (P0). El plano de nodos situado a 0.2m contiene la información fotométrica que es propagada al plano de medida.

Dado que desde P0 no se ha de propagar el flujo luminoso, las medidas experimentales efectuadas en dicho plano se han llevado a cabo empleando únicamente el luxómetro caracterizado en el capítulo 5. En P02 la medida se ha realizado utilizando el luxómetro y el sistema cámara-objetivo gran angular, tal y como se ha especificado en los capítulos 4 y 5.

La fuente de luz empleada en las medidas experimentales de laboratorio se ha realizado con un LED blanco lambertiano, con una emisión de 100lm de flujo luminoso alimentado a una corriente de 350 mA. [PHILIPS 2012].

6.- Resultados experimentales

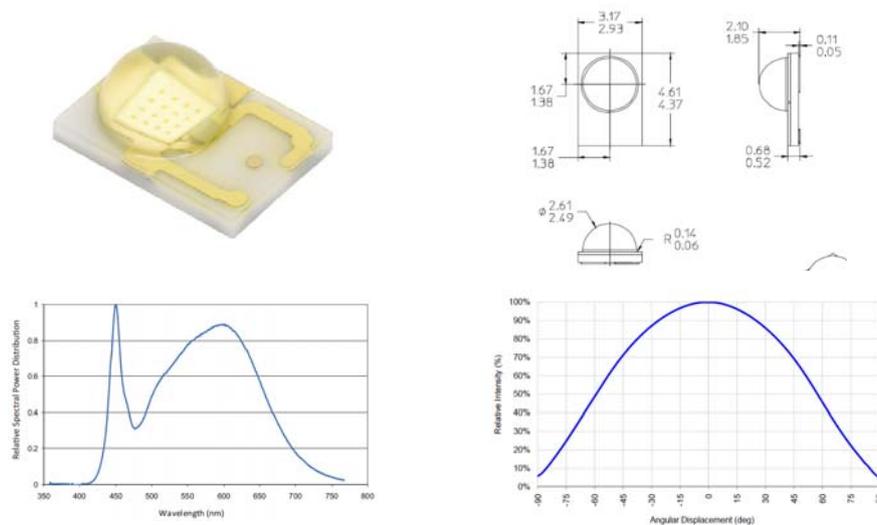


Fig. 6.1.1 Fuente de luz empleada en las medidas experimentales en entorno de laboratorio (arriba izquierda), cotas mecánicas principales (arriba derecha), espectro de emisión (abajo izquierda) y curva de emisión de intensidad relativa (abajo derecha) [PHILIPS 2012]

La estabilidad temporal del LED alimentado a 350mA muestra una variación máxima del 6.25% en la medida de la iluminación a 1m de distancia.

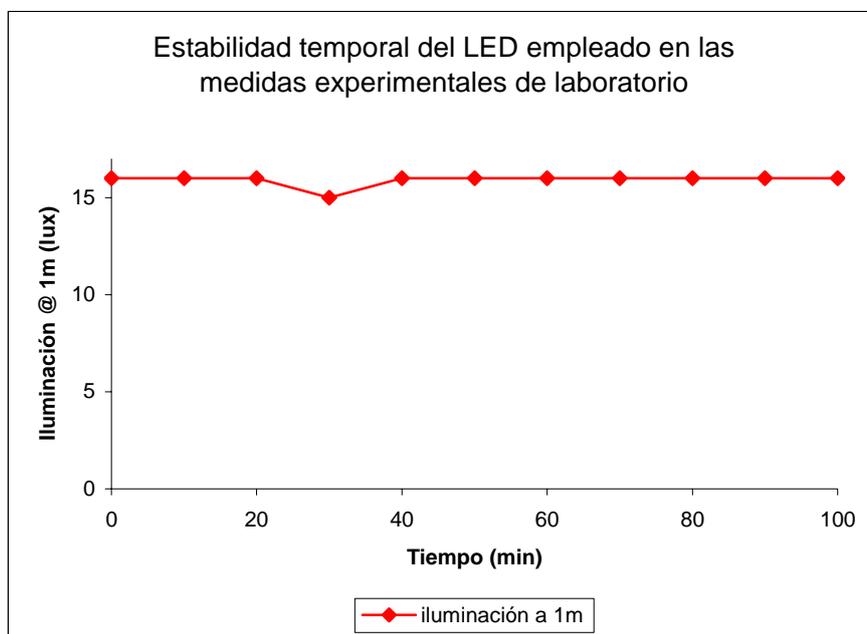


Fig. 6.1.2 Medida de la estabilidad temporal de la iluminación provocada por el LED empleado en las medidas experimentales en un plano a 1m de distancia.

6.1.1. Medida de laboratorio en P02.

En el siguiente apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos en laboratorio, se analizarán las condiciones de medida y los errores experimentales y se mostrarán los gráficos pertinentes para la correcta interpretación de los resultados.

Condiciones de medida

La tabla 6.1.1 expone las condiciones de medida en P02 y los errores asociados al proceso de medida.

Fecha de la medida	10-04-2012
Lugar de medida	Laboratorio 13 CD6 - UPC
Temperatura	23° C
Duración de la medida	1h:23min:00seg
Corriente de trabajo de la fuente de luz	300 mA
Flujo luminoso emitido	100 lm
Distancia P02-fuente luz	2.8m
Dimensiones de P02	3 m x 1.5 m
Muestreo de P02	0.25 m x 0.25 m
Dimensiones de la matriz de P02 y P0	7 filas, 13 columnas
Distancia del plano de nodos al plano de medida	0.2 m
Número de celdas por registro fotométrico	25
Ángulo de aceptación de flujo luminoso	72.0°
Flujo luminoso promedio no aceptado	±3.2%
Error máximo asociado al luxómetro	±8.0%
Error asociado a la estabilidad del LED	6.25%
Error cometido según ley del cuadrado de la distancia	1.0%
Error máximo asociado al sensor (saturación)	2.0%

Tabla 6.1.1

La tabla anterior muestra la fecha, localización y duración de la medida. También quedan indicadas las condiciones de trabajo y el valor de los parámetros de medida como el muestreo de P02, la distancia de medida o el ángulo máximo de aceptación de flujo luminoso.

Empleando la ecuación 5.4.6, es posible determinar el ángulo de aceptación de flujo, que es igual a 72°. Como se ha visto en el capítulo 5, también debe calcularse el error asociado

6.- Resultados experimentales

al flujo luminoso incidente no considerado por el algoritmo. En este caso, el porcentaje promedio de flujo luminoso no contemplado es de un 3.2%. También, se debe prestar atención al error asociado al criterio de saturación, el cual impone un 2% de error en la determinación del flujo computado.

Debe tenerse en cuenta el error en la determinación de la iluminación por parte del luxómetro. Dicho error oscila en torno a un $\pm 8\%$. Por otro lado, la estabilidad de la fuente presenta variaciones del 6.25%, finalmente, empleando la ecuación 4.1.22 se puede calcular el error asociado a la ley del cuadrado de la distancia, dando como resultado un 1%. Según estos datos, la mayor desviación que podría cometerse por acumulación de dichos errores es de un 20% aproximadamente.

Por comodidad de montaje experimental, el plano de referencia se ha situado en una pared a 3.0m de distancia del LED, la figura 6.1.3 muestra un registro fotométrico donde puede verse la fuente de luz en el entorno de medida del laboratorio.

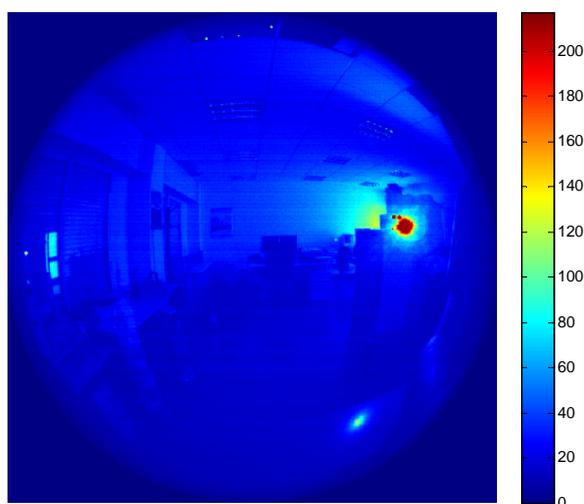


Fig 6.1.3 Ejemplo de registro fotométrico en falso color y normalizado a 255niveles. Se puede apreciar en tonos rojos y marrones una intensidad mayor de luz procedente del LED. En tonos azules queda representada la luz reflejada por paredes, techo y suelo.

6.- Resultados experimentales

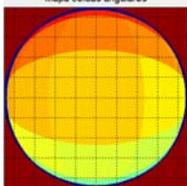
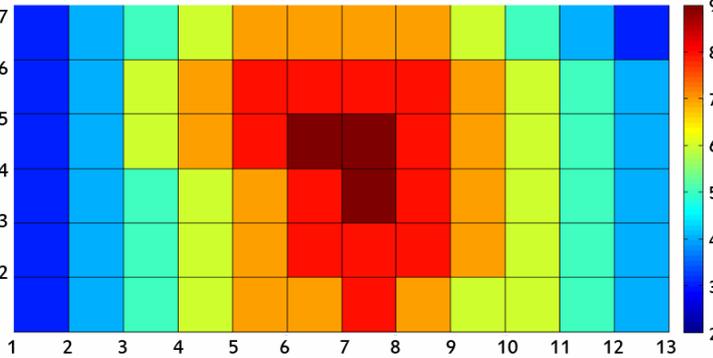
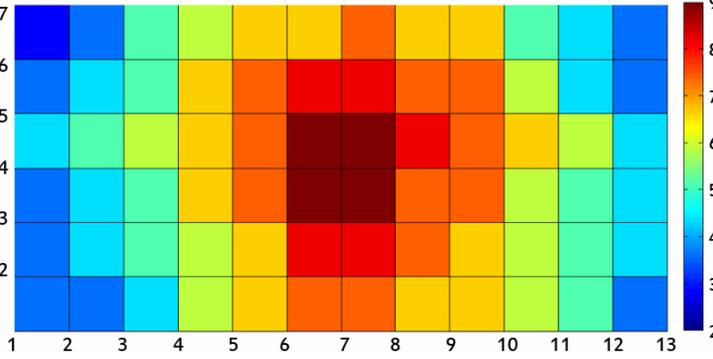
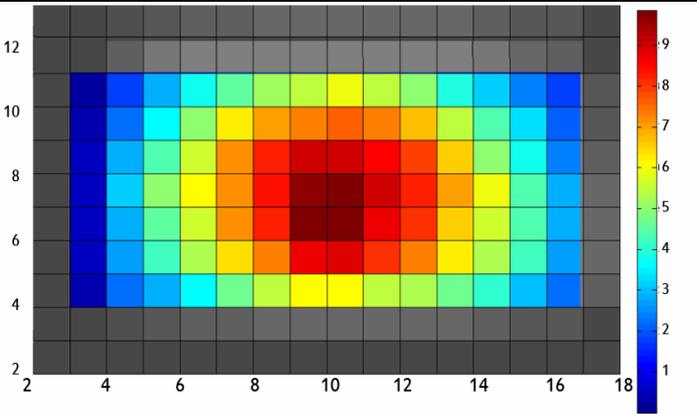
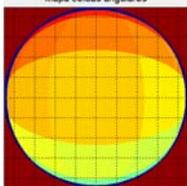
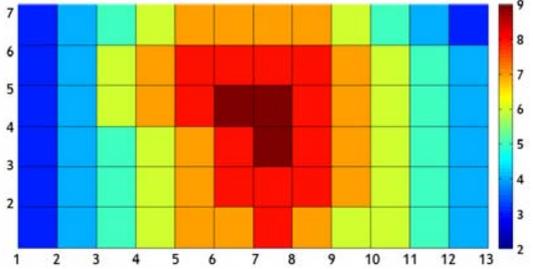
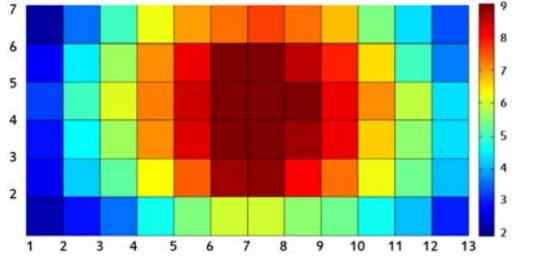
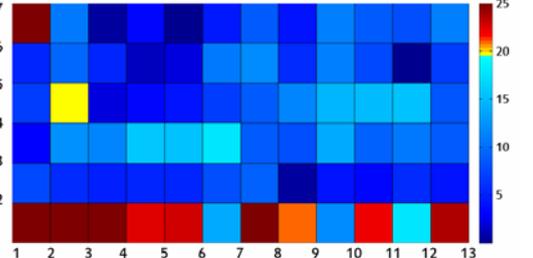
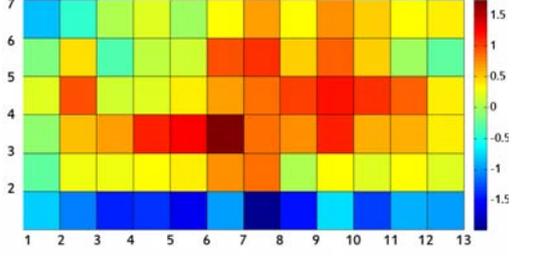
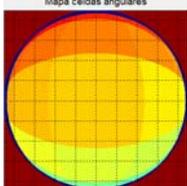
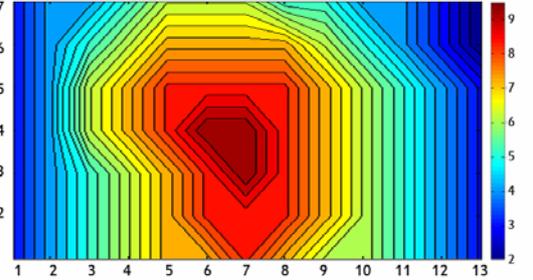
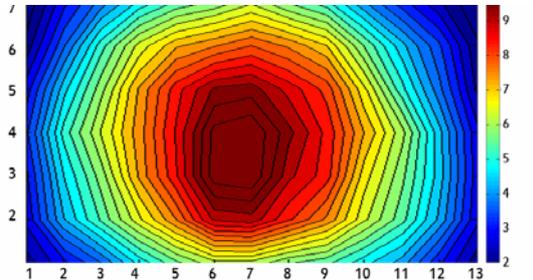
Resultados en laboratorio. Propagación desde P02		
Altura plano de nodos	0.2m	
Ángulo aceptación de flujo	72°	
Número de celdas angulares	25	
Dimensión de las casillas		0.25m x 0.25m
a)	P0	
	E (lux)	
b)	P02	
	E (lux)	
	P02 Registros fotométricos	
c)	P02p	
	E (lux)	

Tabla 6.1.2

6.- Resultados experimentales

Resultados en laboratorio. Análisis de errores		
Altura plano de nodos	0.2m	
Ángulo aceptación de flujo	72°	
Número de celdas angulares	25	
Dimensión de las casillas	0.25m x 0.25m	
Iluminación en P0 (lux) 		Iluminación P02 propagado (lux) 
Error relativo (%) 		Error absoluto (lux) 
Tabla 6.1.3		

Resultados en laboratorio. Mapas isolux		
Dimensiones plano	7x13 casillas	
Dimensiones casilla	0.25m x 0.25 m cada casilla	
Mapa isolux de referencia (lux) 		Mapa isolux propagado (lux) 
Tabla 6.1.4		

Discusión de resultados

Las tablas 6.1.2, 6.1.3 y 6.1.4 muestran los resultados de las medidas experimentales de laboratorio. En la tabla 6.1.2 se muestra la representación de los datos de medida. Cada casilla de las gráficas simboliza un área de medida correspondiente al muestreo establecido sobre los planos ($0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$).

La primera gráfica a) representa la medida de la iluminación de referencia en P0 medida con el luxómetro. En segundo lugar, b) muestra para P02, por un lado, la medida de la iluminación realizada con el luxómetro y por otro, un esquema de la representación matricial de la medida de los registros fotométricos realizada con el sistema objetivo-cámara.

Con la información registrada en P02, se aplica el algoritmo de propagación de flujo a dicha información para obtener finalmente los datos de iluminación propagados sobre P0. La tercera gráfica c) muestra el resultado.

La información que proporciona el algoritmo muestra una zona en escala de gris y una zona en falso color. La zona representada en escala de grises corresponde a la propagación de flujo luminoso en direcciones que no intersecan al plano de referencia y que por tanto quedan fuera de dicho plano. En color se muestra P02 propagado (P02p), que coincide con las dimensiones del plano de nodos.

Las escalas de valores de iluminación para P0 y P02 propagado son coincidentes, oscilando ambas en el rango [0-9] Lux. Cualitativamente, la distribución obtenida por el algoritmo de propagación presenta una similitud elevada entre la distribución de P02 propagado y la distribución de P0.

Para cuantificar la similitud o no de los resultados obtenidos, se emplea el análisis de la tabla 6.1.3. La tabla 6.1.3 muestra los datos correspondientes a los cálculos realizados del error relativo y absoluto entre los datos de P02 propagado y P0.

Análisis del error relativo

El error relativo es representado para cada punto como la razón en valor absoluto entre los datos de P02 propagado y P0 en %.

El valor promedio del error relativo es de un 10.7 %. El 89% de los puntos de medida presenta valores de error inferiores al error máximo de medida que podría cometerse, en este caso, un 20% según la tabla 6.1.1 comentada al principio de este apartado. Existen zonas en los bordes donde el error relativo aumenta hasta valores del 30%

El color amarillo en la escala de valores de % se refiere a este valor. En azul se representan las zonas del P02 propagado con un error relativo inferior, y en tonos rojizos las zonas de P02 propagado con un error relativo superior.

Aunque el error relativo se encuentra dentro de los valores experimentales analizados en la gran mayoría de los puntos de medida, su origen se debe al hecho de que los valores de error relativo se acentúan en el rango de iluminación de [1-10] lux, ya que el luxómetro con el que se han realizado las medidas no es capaz de detectar valores de iluminación inferiores a 1 lux.

Los valores de error relativo que presentan mayores desviaciones se encuentran en los bordes del gráfico. En estas zonas la iluminación presenta los menores valores registrados, del orden de [1-2] lux. Además, los puntos de medida en los bordes presentan un menor efecto de la medida cooperativa, puesto que más allá del límite del plano de medida no existen otros nodos que contribuyan al valor de iluminación propagado en P0.

Análisis del error absoluto

En cuanto a la representación del valor absoluto, se ha calculado y representado la diferencia entre los datos de P02 propagado y P0. Dicha diferencia se representa en Lux.

El valor promedio del error relativo en valor absoluto es de un 0.60 lux. El 38% de los puntos de medida presenta una variación en la iluminación con respecto a P0 situada en el rango ± 0.60 Lux. Los valores máximos de error absoluto son de +1.5 lux (por exceso), y -1.8 lux (por defecto).

6.- Resultados experimentales

El color verde representa una diferencia de 0 lux entre los datos de P02 propagado y P0. En tonos naranjas y rojos se representan las zonas de P02 propagado con un error relativo absoluto por exceso y en tonos azules se muestra un error absoluto por defecto.

El principal motivo por el cual los valores por exceso aparecen en las zonas centrales del área de medida se debe al criterio de saturación impuesto en el capítulo 5. Como ya se estableció, el valor máximo de píxeles de un registro no puede ser mayor a un 2%. No obstante, la saturación sigue existiendo y afecta más cuando la luz incide de forma más intensa en la cámara, esto es, para los puntos de medida más centrados, como se puede ver en la figura 6.1.4. El 21% de los registros fotométricos presentaron zonas saturadas.

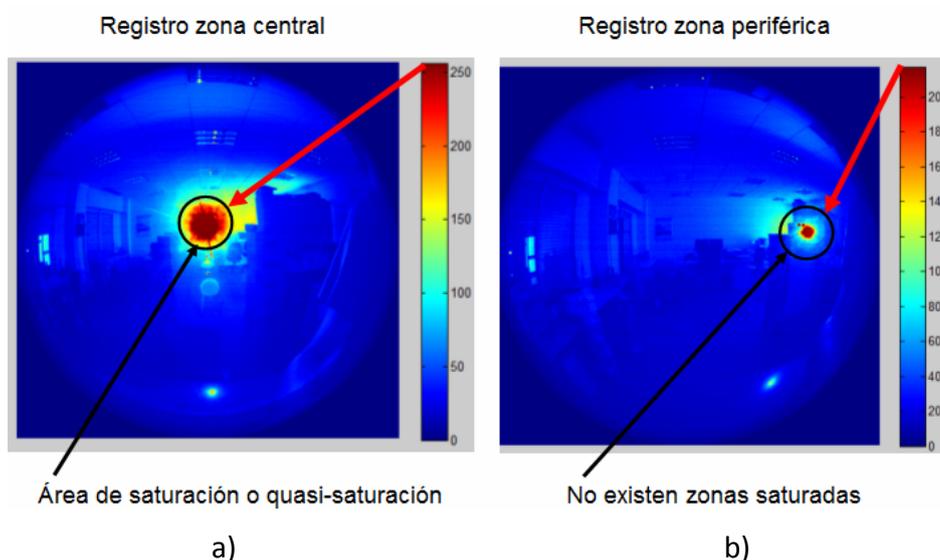


Fig 6.1.4. Comparativa entre dos registros pertenecientes a posiciones distintas del plano P02 en las medidas experimentales realizadas en laboratorio. En la figura a) se ha señalado con un círculo negro la zona de quasi-saturación que falsea la medida, haciendo que la propagación del flujo luminoso no sea correcta. En la figura b) y con el mismo tamaño de círculo negro, se muestra la zona no saturada que envuelve también a la fuente. En condiciones de saturación, el algoritmo presenta mayores desviaciones en la predicción de los mapas isolux.

El número de píxeles saturados o muy cercanos a la saturación aumenta en la zona central. Este hecho se traduce en que en los registros centrales del plano P02 presentan una importancia relativa respecto al entorno de medida mayor de la que en realidad debería tener. Lo que conlleva que el flujo no se distribuya adecuadamente en las zonas adyacentes. De esta forma, la propagación del flujo queda más concentrado en las zonas centrales.

Análisis de los mapas isolux

La tabla 6.1.4 muestra el efecto de los registros que presentan las zonas saturadas en los puntos de medida centrales del plano de nodos. La saturación presente en estos registros se traduce en un falso aumento de la iluminación del mapa isolux mostrado en comparación con el mapa isolux de P0.

El mapa isolux obtenido a partir de la propagación presenta una geometría de líneas isolux de tipo circulares. El patrón geométrico esperado es de tipo circular ya que un LED lambertiano emite con simetría esférica. El mapa isolux referente a P0 no muestra esa geometría circular debido a que la información con la que ha sido generado el mapa responde estrictamente a las medidas realizadas con el luxómetro, en cambio, las medidas que combinan el luxómetro y la cámara permiten obtener un patrón geométrico más realista de la iluminación proporcionada por el entorno de medida.

Las medidas realizadas a 0.2m del plano de referencia, tal y como marca la normativa europea, en conjunción con los parámetros de medida seleccionados como el muestreo del plano de nodos o ángulo de aceptación de flujo, demuestran una buena configuración para realizar las medidas de la iluminación creada en un entorno de laboratorio.

El muestreo del plano de nodos ha sido el adecuado, tanto para obtener un buen resultado geométrico de la iluminación como de los valores absolutos de la misma con respecto al plano de referencia P0.

Estos resultados permiten acceder a la realización de medidas en campo, donde en este caso el entorno de medida presentará como fuentes de luz una instalación de alumbrado público.

Conclusión sobre las medidas de laboratorio

A modo de resumen de las medidas en laboratorio se pueden enunciar las siguientes conclusiones.

- i) La estrategia de medida estudiada en el capítulo 4 ha sido validada en un entorno de laboratorio en el que la fuente de luz es controlada.

6.- Resultados experimentales

- ii) La altura del plano de nodos, el muestreo del mismo, el criterio de saturación y el ángulo de aceptación de flujo luminoso han permitido calcular el mapa isolux referido al entorno de medida de laboratorio.
- iii) El 89% de los puntos del mapa isolux presenta una desviación menor que la definida por el máximo error acumulado que puede cometerse en la medida.
- iv) La medida realizada permite obtener la geometría de la iluminación provocada por la fuente de luz, en este caso un LED lambertiano.
- v) La falta de sensibilidad del luxómetro empleado explica la diferencia de iluminación obtenida en la propagación en la zona periférica del área de medida.
- vi) La diferencia en valor absoluto es del mismo orden de magnitud que la sensibilidad del luxómetro empleado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en campo. La presentación de dichos resultados será similar al caso de las medidas experimentales de laboratorio.

6.2 Resultados experimentales en campo.

El objetivo de las medidas experimentales en campo es comprobar, en un entorno de medida no controlado, la estrategia de medida presentada en el capítulo 4 para un plano de nodos situado a 0.2m del plano de referencia, como se contempla en la normativa europea. Esta comprobación también será realizada para un plano de nodos situado a 1.0m del plano de referencia.

Se evalúan los cambios que se producen al variar la distancia del plano de nodos al plano de referencia a la hora de obtener los mapas isolux, que es el resultado final que se ha de calcular.

Las medidas experimentales realizadas en campo hacen referencia a la obtención del mapa de curvas isolux de una instalación de alumbrado público de una calle peatonal de la ciudad de Terrassa.



Fig 6.2.1 Fotografía de la calle peatonal que ha sido utilizada como entorno de medida para la realización de las medidas experimentales en campo de esta tesis doctoral. La fotografía está tomada desde la calle Pintor Tàpia. Las coordenadas de geolocalización de la calle son (41.56° Norte, 2.02° Oeste) y pueden consultarse en la web google.maps. [Google 2012].

La calle peatonal cuenta con cuatro farolas de vapor de sodio a baja presión situadas cada una con una inclinación distinta con respecto al plano de la medida a 3.5m del plano del suelo. El tamaño de las farolas es de aproximadamente 300mm de diámetro. La calle también

6.- Resultados experimentales

se encuentra rodeada de otros puntos de luz más alejados que también contribuyen, aunque en menor medida, a la iluminación del entorno de medida.

Las dimensiones del plano de medida, y también del plano de nodos, son de 8m x 4m y corresponden a un área englobada dentro del cuadrilátero que marcan las cuatro farolas (Fig. 6.2.2). Se han colocado marcas a modo de garantizar la posición de medida del dispositivo. Las marcas facilitan la colocación de los elementos utilizados. El muestreo empleado de los planos es de 0.25m x 0.25m. Por tanto, las medidas experimentales cuentan con 561 posiciones distribuidas en 33 filas y 17 columnas donde el dispositivo ha realizado la toma de registros fotométricos y/o lectura de la iluminación, según el plano P0, P02 ó P10 (situado a 0.2m y 1.0m del plano de medida respectivamente).

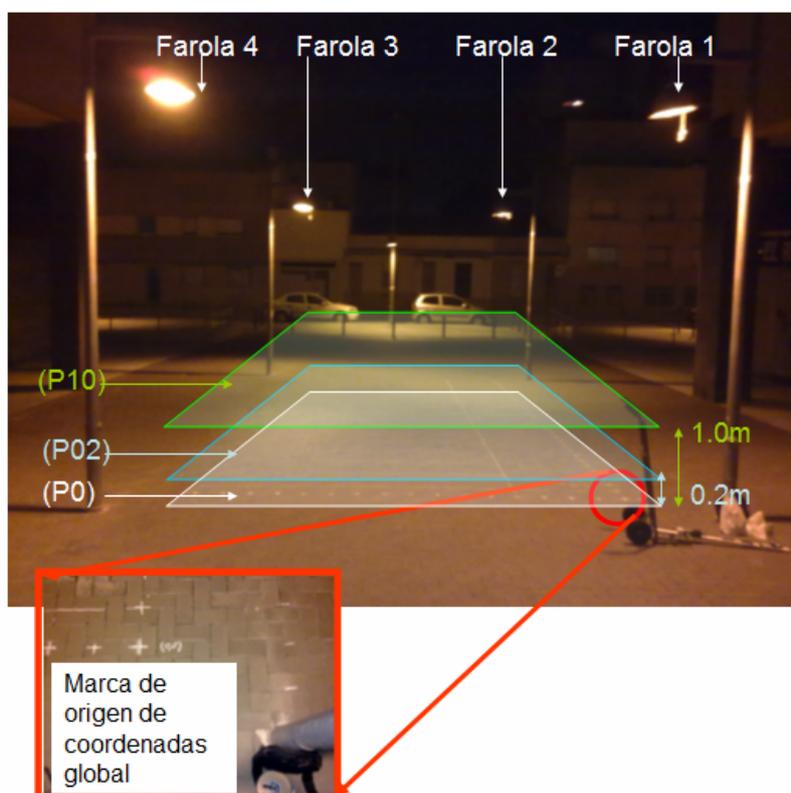


Fig 6.2.2 Fotografía realizada durante las horas nocturnas dedicadas a las medidas experimentales. En la fotografía se advierten las cuatro farolas, que son los puntos de la luz principales que iluminan el plano de medida, resaltadas en líneas blancas. También se ha ampliado un detalle de las marcas realizadas en el suelo para la correcta colocación de los dispositivos utilizados. Por último se han esquematizado los planos de nodos P02 y P10 donde se realizan las medidas experimentales, así como el plano P0 a donde debe ser propagado el flujo luminoso y comparado con la medida de referencia realizada en dicho plano. (Véase anexo C para más documentación gráfica sobre el entorno de medida y el proceso de medida experimental llevado a cabo).

6.2.1. Medida de campo en P02.

En el siguiente apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos en campo para la propagación de flujo luminoso realizada desde P02. Se analizarán las condiciones de medida, los errores experimentales y se mostrarán los gráficos pertinentes para la correcta interpretación de los resultados como ya se ha explicado en el apartado de medidas experimentales de laboratorio.

Condiciones de medida

Fecha de la medida	19-05-2012
Lugar de medida	Calle peatonal .Terrassa
Temperatura	[15-19]° C
Duración de la medida	3h:08min:00seg
Distancia P02-fuente luz	3.8m
Dimensiones de P02	8m x 4m
Muestreo de P02 y P0	0.25m x 0.25m
Dimensiones de la matriz de P02	17 columnas, 33 filas
Distancia del plano de nodos al plano de medida	0.2m
Número de celdas por registro fotométrico	49
Ángulo de aceptación de flujo luminoso	75.0°
Error cometido según ley del cuadrado de la distancia	1.0%
Flujo luminoso promedio no aceptado	±3.2%
Error asociado a la estabilidad de las farolas	1.3%
Error máximo asociado al luxómetro	±8.0%
Error máximo asociado al sensor (saturación)	2.0%

Tabla 6.2.1

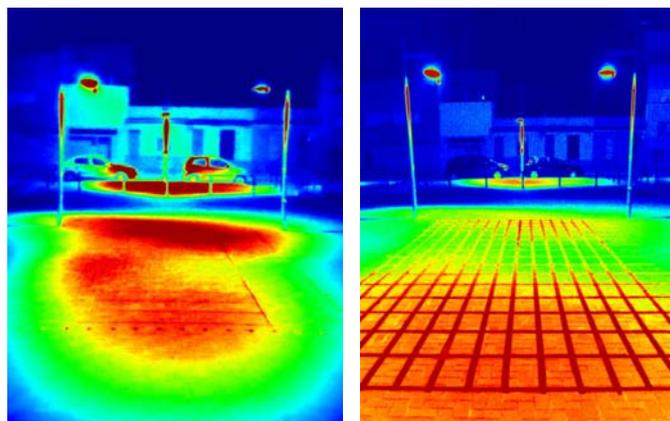
La tabla 6.2.1 muestra la fecha, localización y duración de la medida. También quedan indicadas las condiciones de trabajo y el valor de los parámetros de medida como el muestreo de P02, la distancia de medida o el ángulo máximo de aceptación de flujo luminoso.

Empleando la ecuación 5.4.6, el ángulo de aceptación de flujo es igual a 87°. Como se ha visto en el capítulo 5, el tiempo de cálculo aumenta exponencialmente a partir de los 70°. Para llegar a un equilibrio entre tiempo de cómputo y flujo luminoso captado, se decidió trabajar con un ángulo de aceptación de flujo luminoso igual a 75°. El porcentaje promedio de flujo luminoso no contemplado es de un 3.2%.

6.- Resultados experimentales

En esta nueva serie de medidas, el parámetro a destacar es la dimensión de los planos de medida y nodos. En lugar de los 91 puntos de medida analizados en laboratorio se pasa a 561 puntos de medida. También aumenta el número de celdas angulares por nodo de 25 a 49 al pasar de 72° a 75° de ángulo de aceptación de flujo.

Otro dato destacable fue la incapacidad de controlar la iluminación proporcionada por el sistema de alumbrado público. Durante dos días de los dos primeros fines de semana de mayo de 2012 (5 y 12 de mayo) se registraron cambios bruscos en el estado de iluminación del entorno de medida. Las variaciones fueron tan significativas que se descartó la ejecución de las medidas en varias jornadas y se descartaron las medidas previa realizadas. Todas las medidas experimentales en campo se llevaron a cabo la noche del 19 de mayo de 2012 con un control periódico de la iluminación de referencia medida bajo las cuatro farolas.



5-5-2012

12-5-2012

6.2.3 Iluminación correspondiente al mismo entorno de medida en dos días distintos durante el mes de mayo de 2012. La escala de color es la misma para ambas imágenes. La representación en color permite ver cómo de variable es la iluminación en este entorno de medida donde los tonos rojos simbolizan mayor iluminación y los azules menor iluminación.

La figura 6.2.4 muestra la medida de control donde se comprobó que durante la noche en la que fueron realizadas las medidas, la instalación de alumbrado presentó una estabilidad aceptable. La medida se realizó con una periodicidad de 15min, registrando la iluminación justo debajo de cada farola. La variación en la medida de la iluminación de control para las cuatro farolas fue del 1.3%.

6.- Resultados experimentales

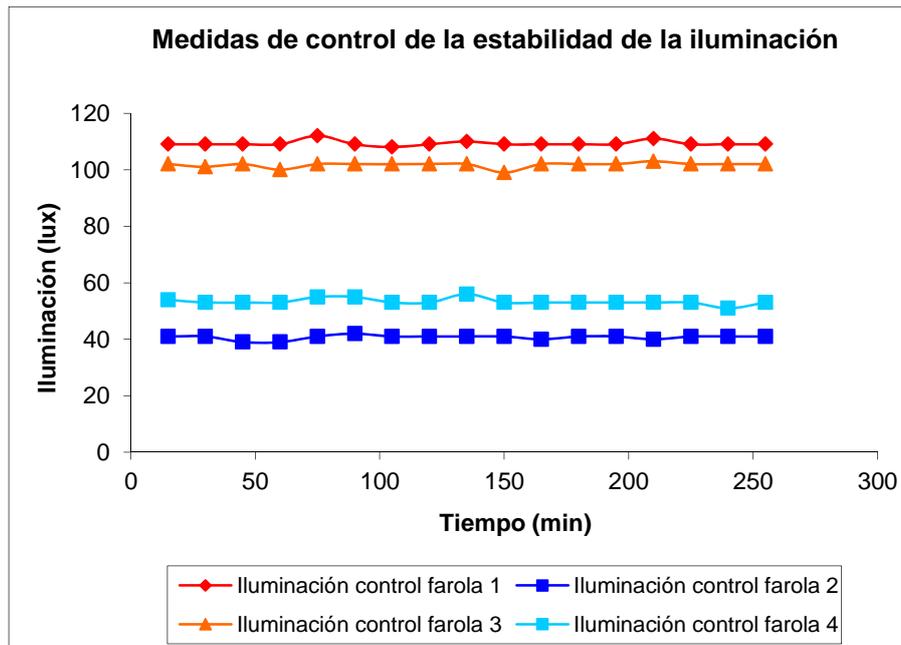


Fig. 6.2.4 Medida de control de la estabilidad de la iluminación registrada en campo. La variación promedio de la iluminación registrada debajo de cada farola fue del 1.3%. La medida en cada farola se realizó cada 15min.

La figura 6.2.5 muestra un registro fotométrico correspondiente a la posición de medida de control de iluminación de la farola 1.

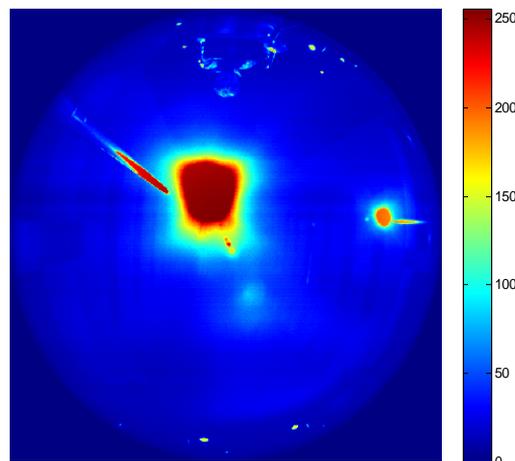
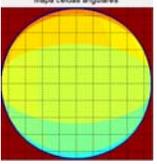
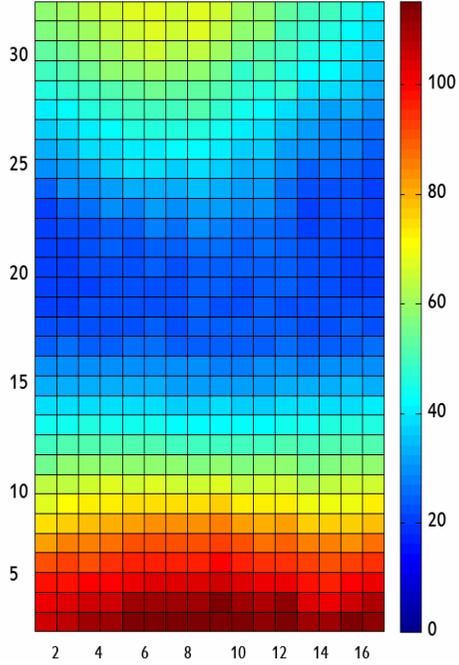
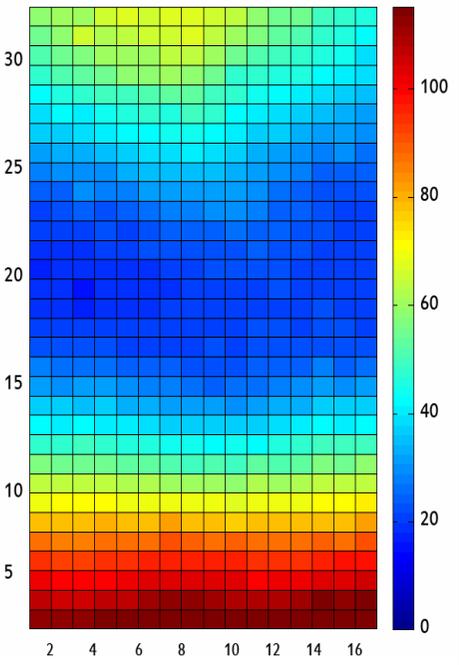
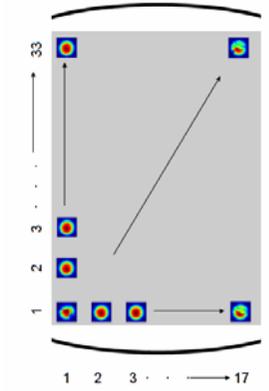
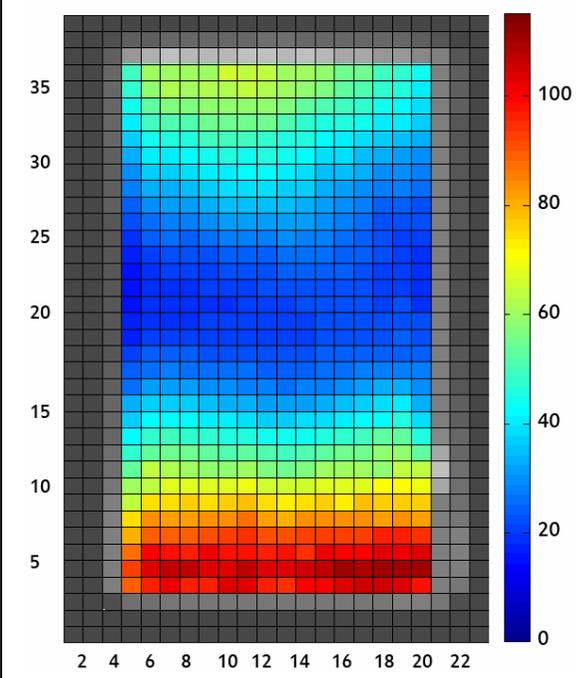
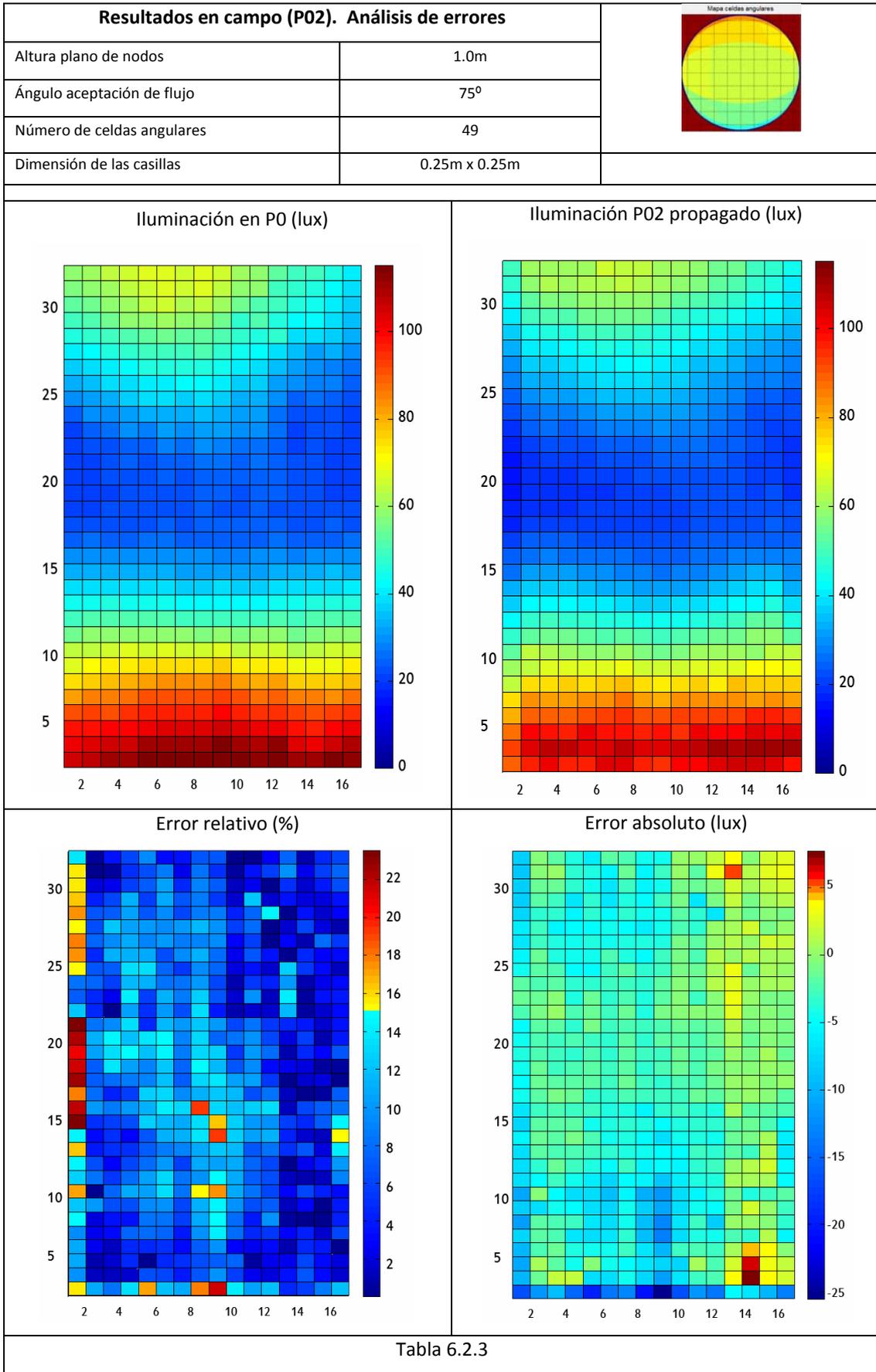


Fig 6.2.5 Registro fotométrico de la farola 1 en falso color y normalizado a 255niveles. Se puede apreciar en tonos rojos y marrones, que indican la mayor intensidad de luz procedente de las cuatro farolas. En la zona más periférica del registro también pueden advertirse pequeños puntos con tonos verdes o amarillos correspondientes a otras fuentes de luz más lejanas y que por tanto contribuyen en menor medida, prácticamente despreciable, a la iluminación de la zona de interés para estas medidas. En tonos azules queda patente la importancia de la luz reflejada en forma difusa por los edificios presentes en la calle.

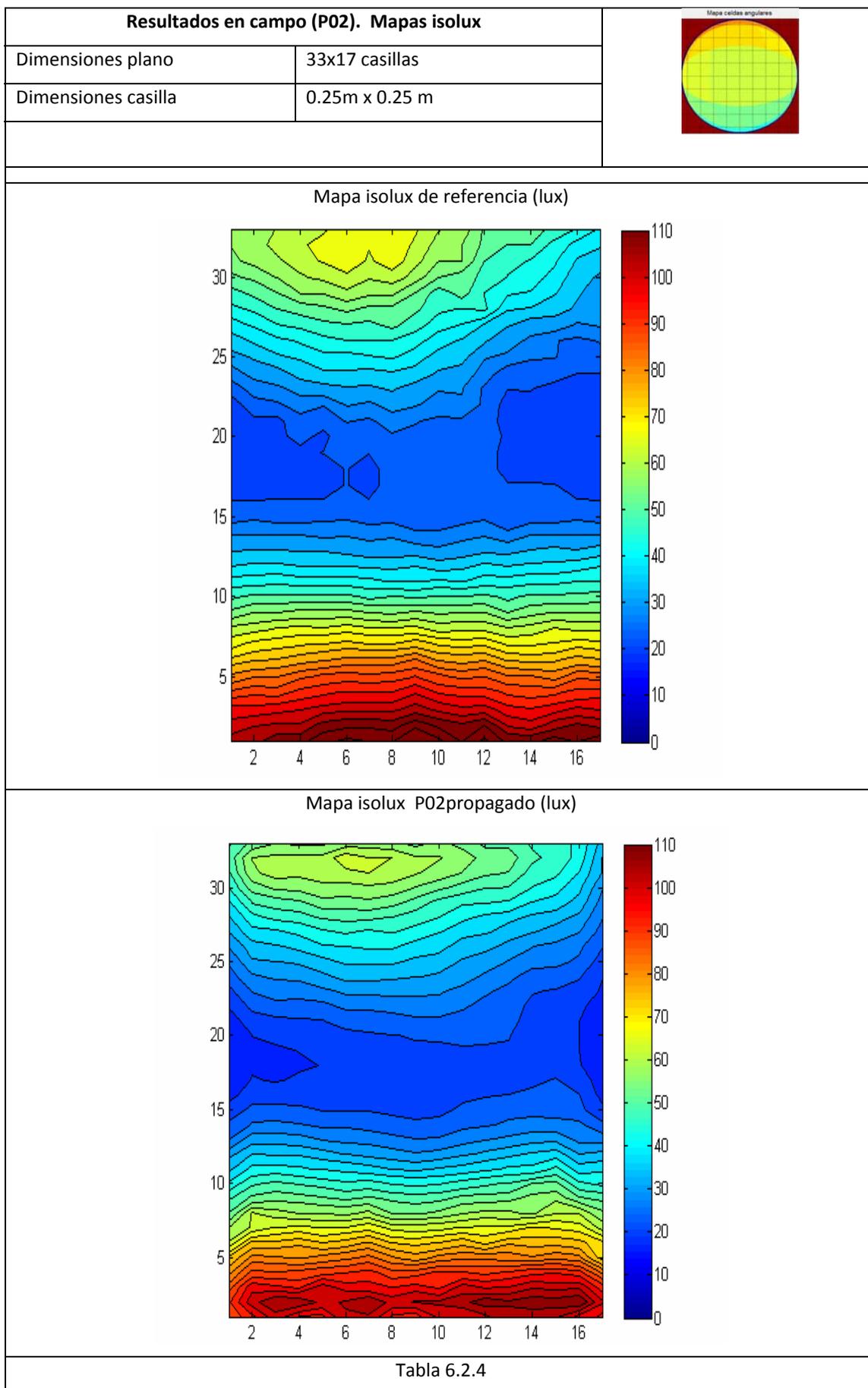
6.- Resultados experimentales

Resultados en campo. Propagación desde P02			
Altura plano de nodos	0.2m		
Ángulo aceptación de flujo	75°		
Número de celdas angulares	49		
Dimensión de las casillas	0.25m x 0.25m		
a) P0 E (lux)	b) P02		c) P02p E (lux)
	E (lux)	Registros fotométricos	
			
Tabla 6.2.2			

6.- Resultados experimentales



6.- Resultados experimentales



Discusión de resultados

De la misma forma que los resultados de laboratorio, las tablas 6.2.2, 6.2.3 y 6.2.4 muestran los resultados de las medidas experimentales en campo para el plano P02. En la tabla 6.2.2 se muestra la representación de los datos de medida. Cada casilla simboliza un área de medida correspondiente al muestreo establecido ($0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$) sobre los planos.

La primera gráfica a) representa la medida de la iluminación de referencia en P0 medida con el luxómetro. En segundo lugar b), para P02, se muestran la medida de la iluminación realizada con el luxómetro y la representación matricial de los registros fotométricos realizada con el sistema objetivo-cámara. En este caso, el número de filas y columnas aumenta hasta 33 y 17 respectivamente.

Con la información registrada en P02, se aplica el algoritmo de propagación de flujo para obtener finalmente los datos de iluminación propagados sobre P0. La tercera gráfica c) muestra el resultado.

De la misma forma que en los resultados de laboratorio, existe una zona sombreada en gris y una zona en falso color. La zona gris corresponde a la propagación de flujo luminoso en direcciones que no intersecan a P0. Al tener en cuenta un mayor número de celdas angulares, la zona sombreada en gris es mayor. En color se muestra P02 propagado (P02p) que coincide con las dimensiones de P02 y P0.

Las escalas de valores de iluminación para P0 y P02 propagado son coincidentes [0-110] Lux. Cualitativamente, la distribución obtenida por el algoritmo de propagación vuelve a presentar una similitud elevada entre la distribución de P02 propagado y la distribución de P0.

La similitud o no de los resultados obtenidos se cuantifica en la tabla 6.1.3, donde se muestran los datos correspondientes a los cálculos realizados del error relativo y absoluto entre los datos de P02 propagado y P0.

Análisis del error relativo

El error relativo es representado para cada punto como la razón en valor absoluto entre los datos de P02 propagado y P0 en %.

6.- Resultados experimentales

El valor promedio del error relativo es de un 6.6 %. El 94% de los puntos de medida presentan valores inferiores al error máximo de medida que podría cometerse; en este caso, un 15.5% según la tabla 6.1.1 comentada al principio de este apartado.

El color amarillo en la escala de valores de % se refiere al 15.5% de error relativo que puede cometerse por acumulación de errores en la medida. En azul se representan las zonas de P02 propagado con un error relativo inferior y en tonos rojizos las zonas de P02 propagado con un error relativo superior.

El mayor error relativo registrado se presenta en la zona central izquierda en P0. Es en esta zona donde el luxómetro presenta una mayor dificultad para medir correctamente los valores de iluminación [0-20] lux. Los puntos que presentan un error relativo superior al máximo contemplado según los datos de la tabla 6.2.1 se sitúan en valores muy cercanos a este límite, y tan solo un 3% de los puntos presentan errores relativos en torno al 20% en todo el plano P02 propagado.

En los bordes del plano de nodos P02, y sobre todo en el borde izquierdo de P02, el error relativo presenta sus valores más altos. El efecto de una menor influencia de la medida cooperativa entre nodos, sumado a la falta de sensibilidad del luxómetro de determinar valores bajos de iluminación, son las causas responsables de estos puntos con un error relativo mayor del esperado.

Análisis del error absoluto

En cuanto a la representación del valor absoluto, se ha calculado y representado la diferencia entre los datos de P02 propagado y P0 y se representa en Lux.

El valor promedio del error relativo en valor absoluto es de 3.8 lux. El 76% de los puntos de medida presenta una variación en la iluminación con respecto a P0 situada en el rango ± 3.8 lux. Los valores máximos de error absoluto son de +10.0 lux (por exceso) y -10.0 lux (por defecto).

El color verde representa una diferencia de ± 3.8 lux entre los datos de P02 propagado y P0. En tonos naranjas y rojos se representan las zonas de P02 propagado con un error relativo absoluto por exceso y en tonos azules se muestra un error absoluto por defecto.

6.- Resultados experimentales

El error absoluto presenta una distribución homogénea en todos los puntos de medida con una tendencia negativa en la gran mayoría de los puntos de medida analizados. Los errores absolutos, tanto por defecto como exceso, se acumulan en los bordes del plano P02. Como se ha comentado en el análisis del error relativo, la falta de nodos que contribuyan a la medida cooperativa es una de las causas principales de este hecho.

Las zonas con error absoluto por exceso son aquellas que pertenecen a las esquinas de las farolas 1 y 2. Las farolas 1 y 2 presentan una orientación prácticamente perpendicular al plano de nodos (Fig. 6.2.2). Cuando la luz incide de forma directa sobre la cámara, esta presenta zonas saturadas cuya cantidad de píxeles es igual a un 2% del total del registro. El efecto es análogo al analizado en el laboratorio, donde el error absoluto presentaba valores positivos en los puntos centrales donde la luz incidía con una intensidad que provocaba la saturación de los registros fotométricos. En esta serie de medidas experimentales, el 11% de los registros presentaron zonas saturadas.

Análisis de los mapas isolux

La tabla 6.2.4 muestra los mapas isolux correspondientes a las medidas realizadas con el luxómetro en P0 y el mapa isolux obtenido a partir de los datos de propagación desde el plano de nodos P02.

El mapa isolux obtenido a partir de la propagación presenta una geometría de líneas isolux muy semejante a las curvas isolux del plano de referencia, con diferencias de subestima de valores en las zonas de bordes y la zona central. Sin embargo, los errores relativo y absoluto muestran una gran concordancia entre los resultados obtenidos y las medidas de referencia.

Las medidas que combinan el luxómetro y la cámara según la estrategia de medida establecida en esta tesis permiten obtener un patrón geométrico realista de la iluminación proporcionada por el entorno de medida.

Las medidas realizadas a 0.2m del plano de referencia, tal y como marca la normativa europea, en conjunción con los parámetros de medida seleccionados como el muestreo del plano de nodos o ángulo de aceptación de flujo, demuestran una buena configuración para realizar las medidas de la iluminación creada en un entorno de laboratorio.

6.- Resultados experimentales

De nuevo, como ya se ha contemplado en los resultados de laboratorio, el muestreo del plano de nodos ha sido el adecuado tanto para obtener un buen resultado geométrico de la iluminación como de los valores absolutos de la misma con respecto al plano de referencia P0. Queda patente por tanto que a 0.2m del plano de referencia, el muestreo de $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ es suficiente para la obtención de los mapas isolux.

A partir de estos resultados, se procede al análisis de las medidas realizadas en campo a una altura mayor con respecto a P0, en este caso a 1.0m de distancia.

Conclusión sobre las medidas en campo (P02).

A modo de resumen de las medidas en campo para el plano P02, se pueden enunciar las siguientes conclusiones.

- i) La estrategia de medida estudiada en el capítulo 4 ha sido validada en un entorno de medida en el que las fuentes de luz no son controladas, como en el caso de una instalación de alumbrado público.
- ii) Los resultados obtenidos para el mapa isolux demuestran que es posible obtener la reconstrucción del mapa isolux sobre P0 a partir de medidas en un plano de nodos situado a 0.2m, como marca la normativa europea.
- iii) La altura del plano de nodos, el muestreo del mismo, el criterio de saturación y el ángulo de aceptación de flujo luminoso han permitido calcular el mapa isolux referido al entorno de medida de campo.
- iv) Los resultados obtenidos en campo para P02 demuestran que las medidas experimentales pueden realizarse de forma dinámica, puesto que todos los parámetros de medida son reproducibles en una medida en movimiento.
- v) La sensibilidad del luxómetro empleado no ha sido suficiente para determinar los valores correctos de iluminación en las zonas que presentan valores en torno a 0-20lux.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en campo para un plano de nodos situado a 1.0m. La presentación de dichos resultados será análoga al caso de las medidas mostradas en este apartado.

6.2.2. Medida de campo en P10.

En el siguiente apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos en campo para la propagación de flujo luminoso realizada desde P10. Se analizarán las condiciones de medida, los errores experimentales y se mostrarán los gráficos pertinentes para la correcta interpretación de los resultados, como ya se ha explicado en el apartado de medidas experimentales de laboratorio.

Condiciones de medida

Fecha de la medida	19-05-2012
Lugar de medida	Calle peatonal .Terrassa
Temperatura	[15-19]° C
Duración de la medida	3:35:00
Distancia P10-fuente luz	3.0m
Dimensiones de P10	8m x 4m
Muestreo de P10 y P0	0.25m x 0.25m
Dimensiones de la matriz de P02	17 columnas, 33 filas
Distancia del plano de nodos al plano de medida	1.0m
Número de celdas por registro fotométrico	529
Ángulo de aceptación de flujo luminoso	70.0°
Error cometido según ley del cuadrado de la distancia	1.5%
Flujo luminoso promedio no aceptado	3.6%
Error asociado a la estabilidad de las farolas	1.3%
Error máximo asociado al luxómetro	8.0%
Error máximo asociado al sensor (saturación)	2.0%

Tabla 6.2.5

La tabla 6.2.5 muestra la fecha, localización y duración de la medida. También quedan indicadas las condiciones de trabajo y el valor de los parámetros de medida como el muestreo de P10, la distancia de medida o el ángulo máximo de aceptación de flujo luminoso.

Empleando la ecuación 5.4.6, el ángulo de aceptación de flujo es igual a 76°. De la misma forma que en el apartado anterior, para llegar a un equilibrio entre tiempo de cómputo y flujo luminoso captado, se decidió trabajar con un ángulo de 70°. El porcentaje promedio de flujo luminoso no contemplado en cada registro es de un 3.2%.

6.- Resultados experimentales

El parámetro a destacar en esta ocasión es el número de celdas, que pasa de las 49 a las 529. Esto se debe no solo al ángulo de aceptación de flujo sino también a la altura a la que se realiza la medida, a mayor altura del plano de nodos, mayor número de celdas angulares contendrá cada registro.

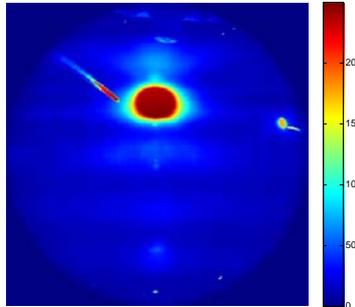


Fig 6.2.6 Ejemplo de registro fotométrico en falso color y normalizado a 255 niveles, donde se puede ver la farola 1 desde el plano de nodos P10. Se puede apreciar en tonos rojos y marrones, que indican la mayor intensidad de luz procedente de las cuatro farolas. En estos registros puede verse cómo las farolas más alejadas aparecen en zonas más periféricas del registro debido a que este ha sido tomado a una altura mayor.

La estabilidad de las fuentes de luz también fue controlada en esta serie de medidas. Los resultados se muestran en la figura 6.2.7:

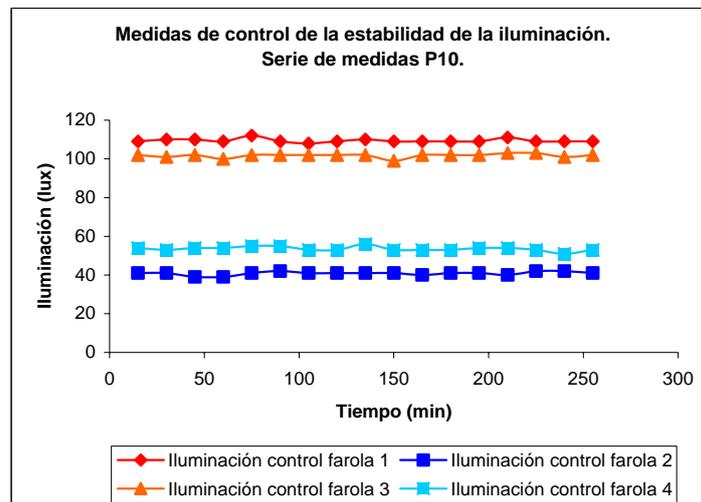


Fig. 6.2.7 Medida de control de la estabilidad de la iluminación registrada en campo. La variación promedio de la iluminación registrada debajo de cada farola fue del 1.3%. La medida en cada farola se realizó cada 15min.

6.- Resultados experimentales

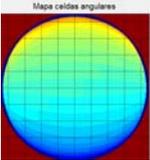
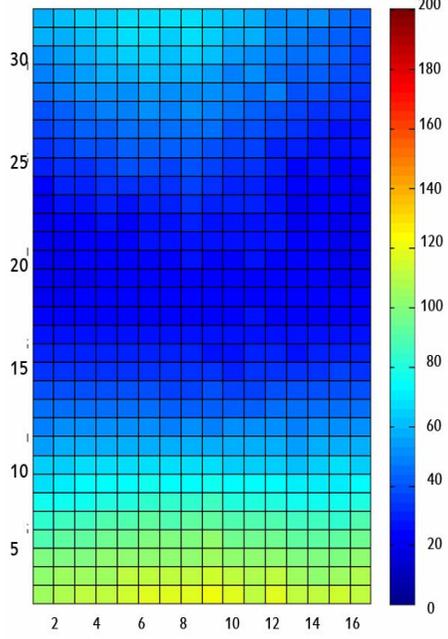
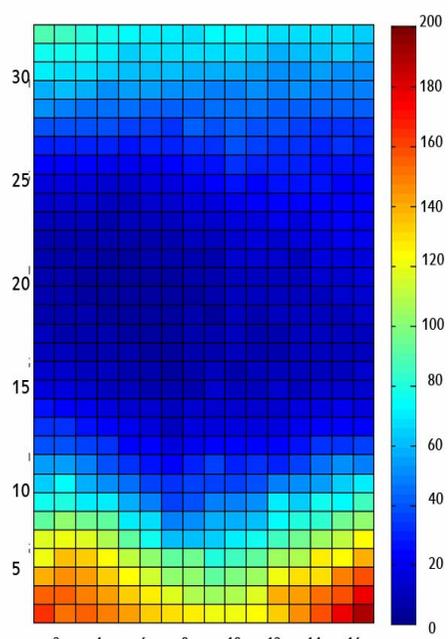
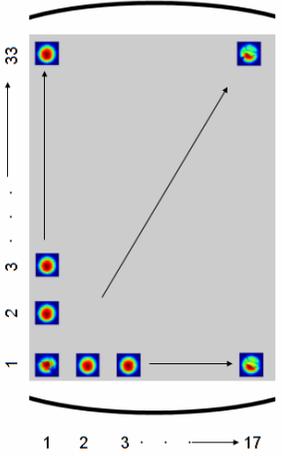
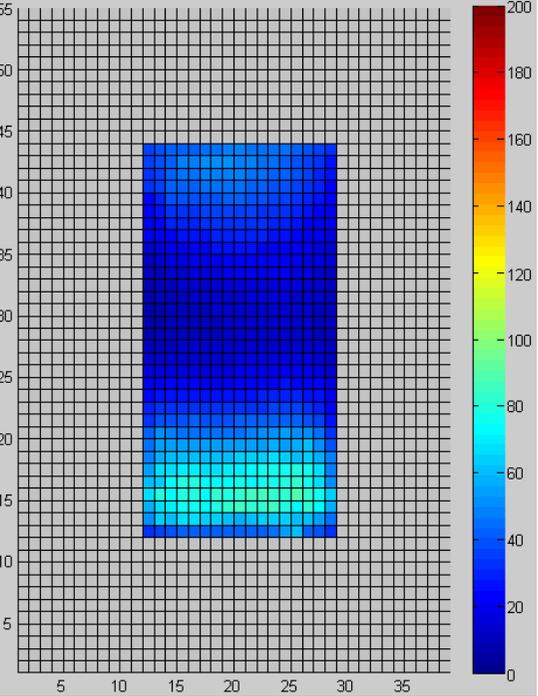
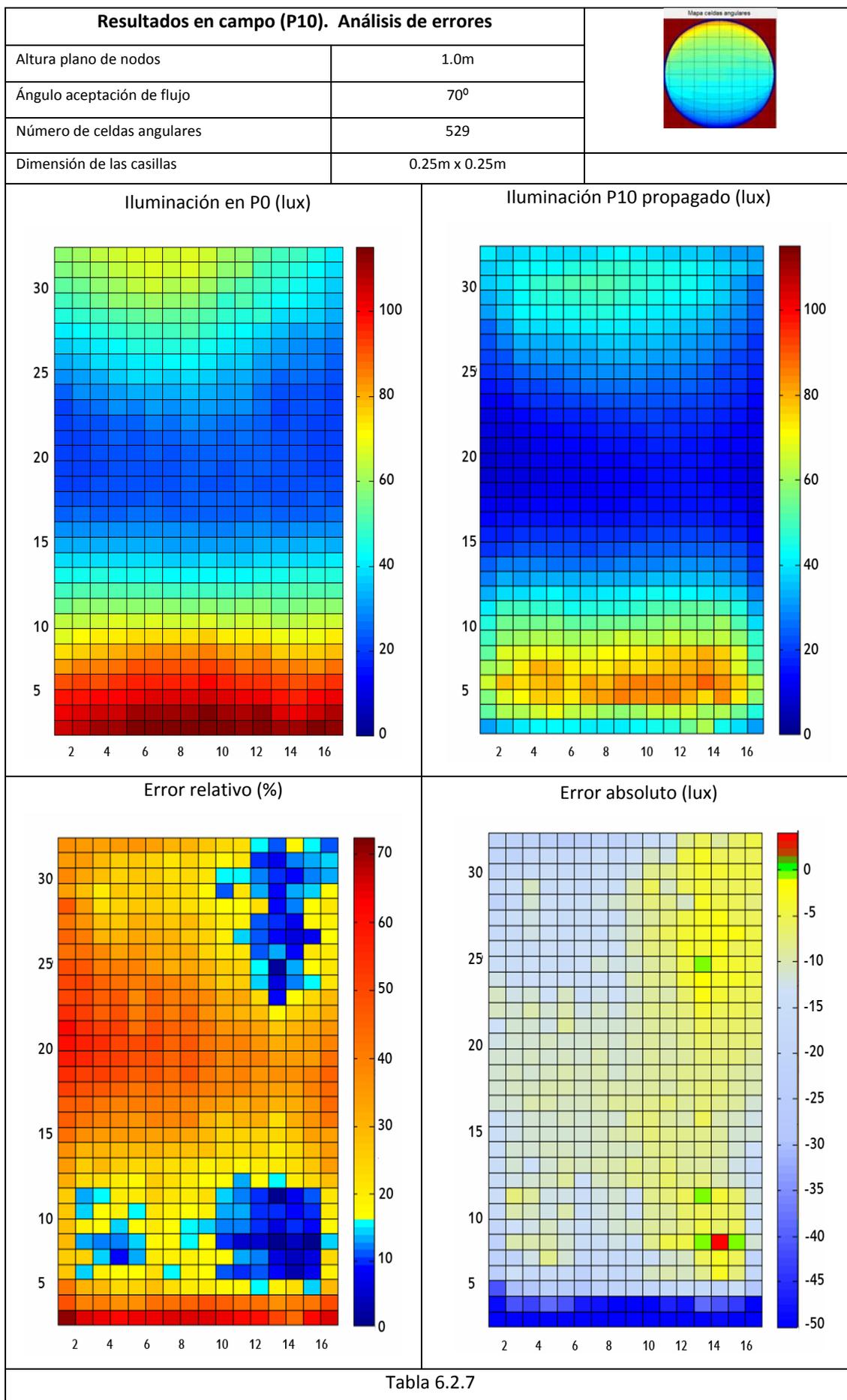
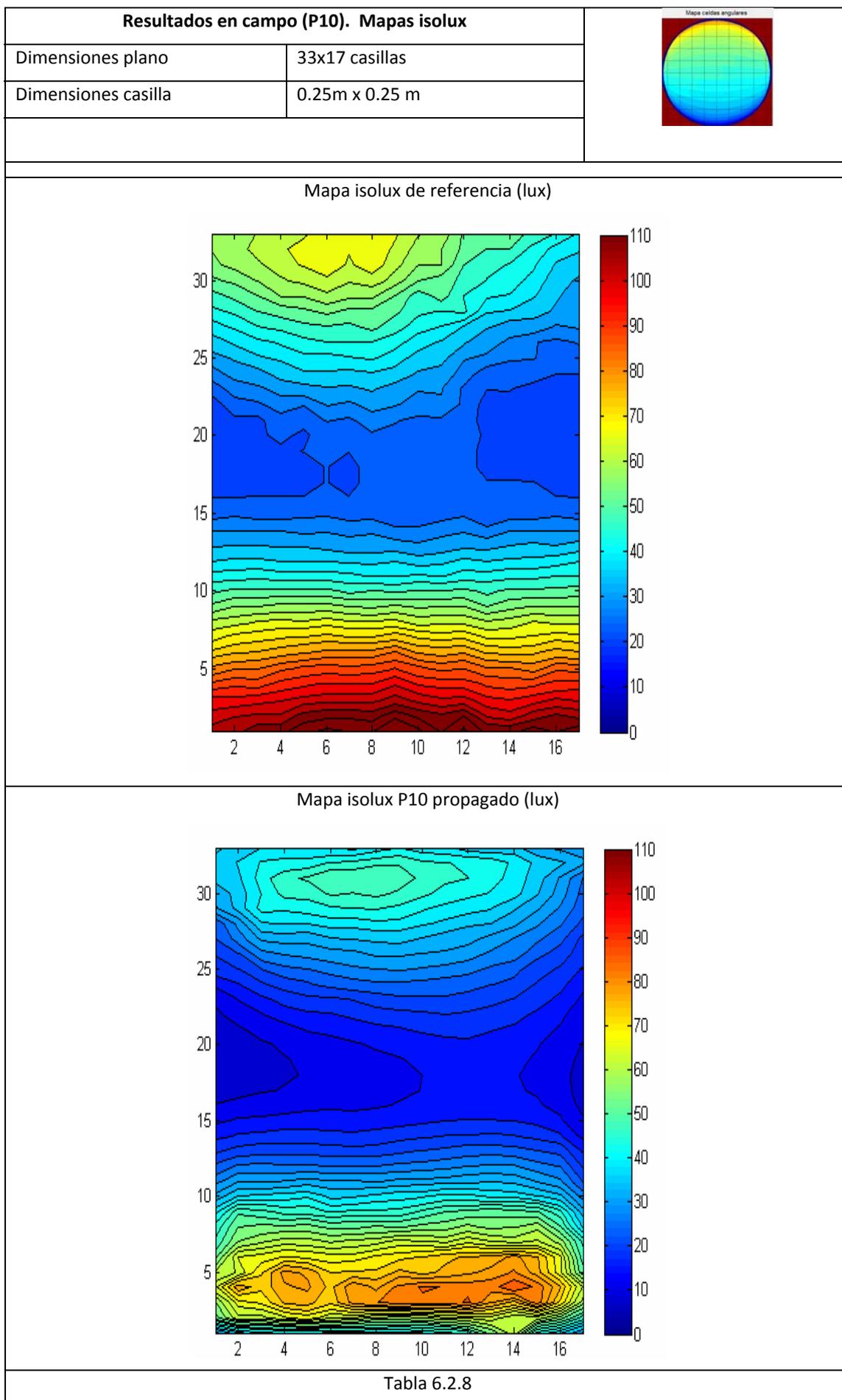
Resultados en campo. Propagación desde P10			
Altura plano de nodos	1.0m		
Ángulo aceptación de flujo	70°		
Número de celdas angulares	529		
Dimensión de las casillas	0.25m x 0.25m		
a) P0 E (lux)	b) P10		c) P10p E (lux)
	E (lux)	Registros fotométricos	
			

Tabla 6.2.6

6.- Resultados experimentales



6.- Resultados experimentales



Discusión de resultados

De la misma forma que para la representación de los resultados de campo para P02, las tablas 6.2.6, 6.2.7 y 6.2.8 muestran los resultados de las medidas experimentales en campo para el plano P10. En la tabla 6.2.6 se muestra la representación de los datos de medida. Cada casilla simboliza un área de medida correspondiente al muestreo establecido sobre los planos ($0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$).

La primera gráfica a) representa la medida de la iluminación de referencia en P0. Medida con el luxómetro. En segundo lugar b), para P02, se muestran la medida de la iluminación realizada con el luxómetro y la representación matricial de los registros fotométricos realizada con el sistema objetivo-cámara.

Con la información registrada en P10, se aplica el algoritmo de propagación de flujo para obtener finalmente los datos de iluminación propagados sobre P0. La tercera gráfica c) muestra el resultado.

De la misma forma que en los resultados de campo P02, existe una zona sombreada en gris y una zona en falso color. La zona gris corresponde a la propagación de flujo luminoso en direcciones que no intersecan a P0. Al tener en cuenta un mayor número de celdas angulares, la zona sombreada en gris es aún mayor. En color se muestra P10 propagado (P10p), que coincide con las dimensiones de P10 y P0.

Las escalas de valores de iluminación para P0 y P02 propagado en este caso no son coincidentes. Comparando los valores máximos de ambas escalas existe un 37% de diferencia entre las escalas. A diferencia de los resultados vistos hasta ahora, el plano de nodos se encuentra cinco veces más alejado del plano de referencia, lo que se traduce en una subestima del valor de iluminación cuando es propagado. Como se puede comprobar en la escala de colores, el plano de nodos P10 presenta una distribución de los datos de iluminación así como de forma muy distinta a la vista en el plano de referencia.

Sin embargo y de forma cualitativa, la distribución obtenida por el algoritmo de propagación vuelve a presentar una similitud elevada entre la distribución de P10 propagado y la distribución de P0. Este hecho vuelve a indicar que la caracterización geométrica estudiada para el objetivo gran angular empleado en la determinación de la dirección de la luz es correcta.

6.- Resultados experimentales

La diferencia de valor absoluto pero no en forma geométrica de la distribución de la iluminación, como se verá más adelante en el análisis de los mapas isolux, se debe a la falta de captación de flujo luminoso en el plano de nodos, es decir, existen direcciones angulares que no han sido muestreadas y por lo tanto no contribuyen a la determinación correcta del flujo luminoso incidente en el plano de nodos P10.

En la tabla 6.2.7 se muestran los datos correspondientes a los cálculos realizados del error relativo y absoluto entre los datos P10 propagado y P0.

Análisis del error relativo

El error relativo es representado para cada punto como la razón en valor absoluto entre los datos de P10 propagado y P0 en %.

Al representar los datos de iluminación del plano de referencia y los datos de iluminación para P10 propagado en la escala de valores de P0, las similitudes entre ambos conjuntos de datos se hace más evidente, aunque las diferencias en valor absoluto son importantes y deben ser analizadas en profundidad.

El valor promedio del error relativo es de un 30.0 %. El 87% de los puntos de medida presentan valores superiores al error máximo de medida que podría cometerse, en este caso, un 16.4% según la tabla 6.2.5 comentada al principio de este apartado.

El color amarillo en la escala de valores de % se refiere al 16.4% de error relativo que puede cometerse por acumulación de errores en la medida. En azul se representan las zonas de P10 propagado con un error relativo inferior y en tonos rojizos las zonas de P10 propagado con un error relativo superior.

El gráfico del error relativo muestra un error relativo mayor al error experimental en toda la zona del plano de nodos. Pequeñas zonas en la esquina izquierda inferior y superior derecha presentan valores dentro del error máximo experimental analizado. Los mayores errores se concentran de igual forma que para P02, en la zona izquierda intermedia de P10 así como en los bordes.

Análisis del error absoluto

En cuanto a la representación del valor absoluto, se ha calculado y representado la diferencia entre los datos de P10 propagado y P0 y se representa en Lux.

El valor promedio del error relativo es de un -14.5 lux por defecto. Solo el 1% de los valores de P10 propagado presentan una diferencia de 0 lux. Prácticamente todos los puntos de P10 propagado se encuentran con valores subestimados.

Las diferencias más importantes se encuentran en los bordes, sobre todo en el inferior donde las diferencias llegan a ser de hasta 50 lux. No obstante, no se debe olvidar que esta zona presenta una menor contribución de la medida cooperativa entre nodos. Este hecho, sumado al insuficiente muestreo a la vista de los resultados, se traduce en grandes diferencias en la determinación de la iluminación.

En el resto de P10 propagado el error absoluto presenta una distribución homogénea en todos los puntos de medida con una diferencia negativa en todos los puntos analizados.

En esta ocasión, hasta un 23% de puntos de medida registraron zonas saturadas de relevancia en los registros fotométricos, un 12% más que para las series de medidas de P02. No obstante y aunque los puntos de medida se han situado más cerca de las fuentes de luz, el muestreo aplicado en esta ocasión no ha dado lugar a una propagación en la que se detecten zonas con valores de iluminación superiores a los esperados.

Análisis de los mapas isolux

La tabla 6.2.8 muestra los mapas isolux correspondientes a las medidas realizadas con el luxómetro en P0 y el mapa isolux obtenido a partir de los datos de propagación desde el plano de nodos P10.

El mapa isolux obtenido a partir de la propagación presenta una geometría de líneas isolux muy semejante a las curvas isolux del plano de referencia, con diferencias de subestima de valores en todo el mapa. No obstante se podría decir que tanto el mapa isolux calculado para P02 y para P10 son, a falta de detalles en las zonas de bordes, prácticamente iguales en lo que a distribución de las curvas isolux se refiere.

6.- Resultados experimentales

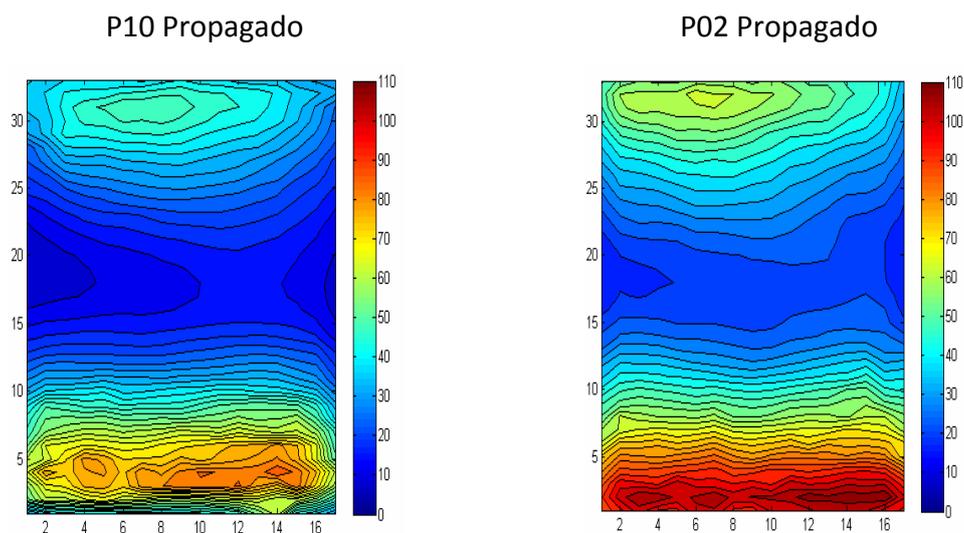


Fig 6.2.8 Comparativa entre los mapas isolux propagados desde P02 y P10. Aun partiendo de datos de iluminación muy diferentes como son los medidos en los planos de nodos P02 y P10, la distribución de ambos es muy similar, lo que indica claramente que la caracterización geométrica de la cámara se ha realizado correctamente y que el plano de nodos P10 presenta un muestreo inferior al necesario para proporcionar la información correcta sobre el plano de referencia.

El análisis de errores relativo y absoluto sugiere una modificación en la realización de las medidas para poder obtener un mapa isolux final con unos valores absolutos adecuados a los esperados.

Al aumentar la altura del plano de nodos, el ángulo de incidencia relativo que presentan las fuentes luminosas es mayor, lo que se traduce en un valor de la iluminación inferior debido a la respuesta direccional del luxómetro. En estas condiciones, el muestreo de 0.25m x 0.25m resulta insuficiente para obtener la información fotométrica correcta de las fuentes luminosas. La interpolación de medida a través de la generación artificial de nodos se hace en este sentido necesaria. Se deriva por tanto una serie de conclusiones que se citan a continuación.

Conclusión sobre las medidas en campo (P10).

A modo de resumen de las medidas en campo para el plano P10, se pueden enunciar las siguientes conclusiones.

- i) La estrategia de medida estudiada en el capítulo 4 ha sido validada parcialmente en un entorno de medida en el que las fuentes de luz no son controladas, como es el caso de una

instalación de alumbrado público para un plano de nodos situado a 1.0m del plano de referencia.

- ii) Los resultados obtenidos para el mapa isolux demuestran que es posible obtener la reconstrucción geométrica del mapa isolux sobre P0 a partir de medidas en un plano de nodos situado a 1.0m, pero con diferencias notables en los valores de error relativo y absoluto.
- iii) La altura del plano de nodos, el muestreo del mismo, el criterio de saturación y el ángulo de aceptación de flujo luminoso no han permitido calcular correctamente el valor absoluto del mapa isolux.
- iv) Es necesario aumentar el muestreo del plano de nodos P10.

Generación de internodos

Puesto que el valor absoluto del mapa isolux obtenido se aleja significativamente del esperado, se ha optado por generar un conjunto de internodos con el objetivo de realizar una interpolación de la medida. La interpolación aplicada consiste en generar puntos de medida internodos, de forma que la separación entre un nodo y un internodo sea la mitad del muestreo impuesto hasta ahora. La figura 6.2.9 esboza la geometría de la interpolación propuesta.

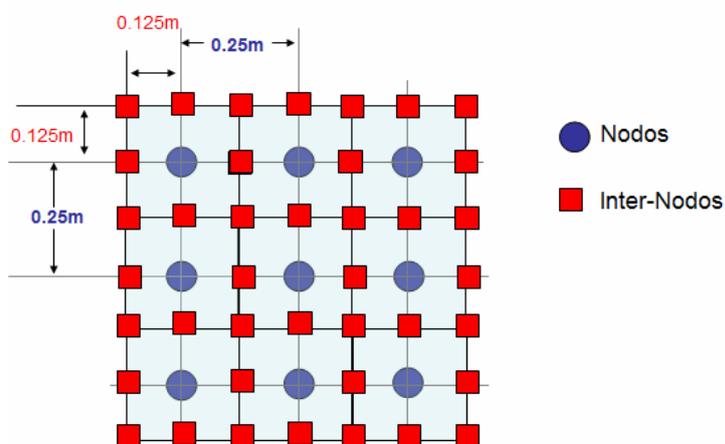


Fig 6.2.9 Esquema que representa los puntos inter-nodos generados para la interpolación. La separación entre nodos e inter-nodos es de 0.125m en ambas direcciones.

Los parámetros de la tabla 6.2.1 quedarían inalterados salvo las filas correspondientes

6.- Resultados experimentales

al muestreo del plano de nodos como se puede ver en la tabla 6.2.9. Respecto al tiempo necesario, sería necesaria hasta cuatro veces más de duración de la medida experimental. Una duración prácticamente inviable para una que la realice una persona sin ningún tipo de proceso automático.

La interpolación aumenta el muestreo del plano de nodos P10, pero no el muestreo de P0 que queda exactamente igual. De esta forma, se evita aumentar el número de celdas de 529 a 2025, que sería el valor correspondiente para ese muestreo de P0 a 1.0m de distancia del plan de nodos.

Fecha de la medida	19-05-2012
Lugar de medida	Calle peatonal .Terrassa
Temperatura	[15-19]° C
Duración de la medida	13h:00min:00seg
Distancia P10-fuente luz	3.0m
Dimensiones de P10	8m x 4m
Muestreo de P10	0.125m x 0.125m
Dimensiones de la matriz de P10	35 columnas, 67 filas
Muestreo de P0	0.25m x 0.25m
Distancia del plano de nodos al plano de medida	1.0m
Número de celdas por registro fotométrico	529
Ángulo de aceptación de flujo luminoso	70.0°
Error cometido según ley del cuadrado de la distancia	1.5%
Flujo luminoso promedio no aceptado	±3.6%
Error asociado a la estabilidad de las farolas	1.3%
Error máximo asociado al luxómetro	±8.0%
Error máximo asociado al sensor (saturación)	2.0%

Tabla 6.2.9

Con una separación menor entre puntos de medida y puntos inter-nodos, la iluminación es considerada nuevamente constante en las cuadrículas de 0.125x0.125 m² del plano de nodos. El flujo de las celdas centrales de los 8 puntos inter-nodos que rodean a cada nodo contribuye aditivamente a la propagación de flujo hacia las cuadrículas principales en P0 que corresponden a cada nodo. Nos referimos a las cuadrículas del plano de referencia que se encuentran justo debajo de cada nodo y que equivalen angularmente a la celda central de cada registro fotométrico. La figura 6.2.10 muestra un esquema simplificado de la contribución de los inter-nodos a la interpolación de la medida.

6.- Resultados experimentales

Cada uno de los 8 inter-nodos que rodean a cada nodo contribuye a la propagación de flujo luminoso sobre la cuadrícula principal de cada nodo y por tanto a la determinación de la iluminación sobre P0.

La estrategia de generación de inter-nodos impone una serie de aproximaciones que deben ser tenidas en cuenta:

- i) El registro fotométrico asociado a los 8 inter-nodos que rodean a un nodo coincide con el asociado a dicho nodo.
- ii) El valor de iluminación asociado a los 8 inter-nodos que rodean a un nodo coincide con el asociado a dicho nodo.
- iii) El número de celdas angulares de los registros fotométricos asociado a cada nodo es el mismo para los inter-nodos.
- iv) El flujo luminoso contenido en cada celda de los puntos inter-nodos es considerado homogéneo en cada celda.

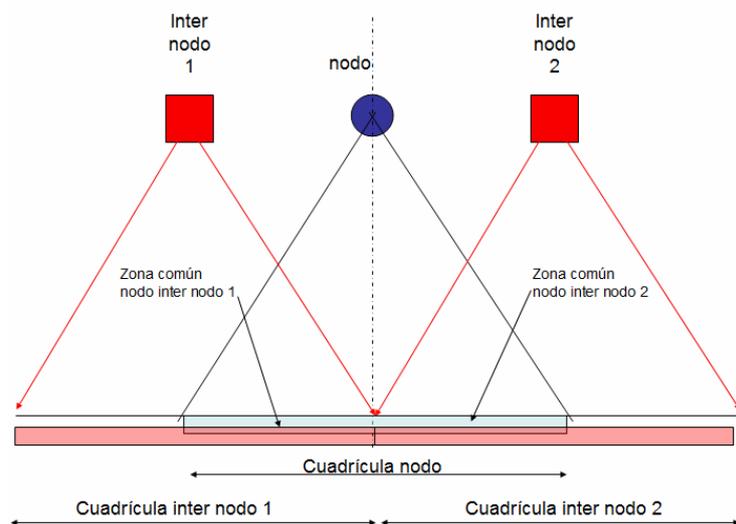


Fig 6.2.10 Esquema que representa cómo los internodos contribuyen a la interpolación de la medida de forma aditiva. Los registros correspondientes a cada internodo permitirán al algoritmo computar un flujo luminoso del que antes no se tenía constancia debido a la falta de muestreo del plano de nodos. Este efecto contribuirá aditivamente al valor de la iluminación final del mapa isolux.

6.- Resultados experimentales

La condición i) es necesaria para poder interpolar no solo la información acerca del valor de iluminación en cada nodo sino también la información asociada a la distribución geométrica de la iluminación del entorno de medida.

La condición ii) asigna un valor de iluminación igual al asociado al nodo que rodea para determinar la iluminación en cada cuadrícula del plano de referencia.

La condición iii) impone el mismo muestreo angular de los registros asociados a nodos e inter-nodos con el fin de optimizar el proceso de cálculo.

Finalmente, la condición iv) impone que el flujo asociado a cada celda de los puntos internodos se encuentra distribuido uniformemente. Las dimensiones de las celdas angulares consideradas a 1.0m de altura son lo suficientemente pequeñas para ser consideradas como conjuntos de píxeles del mismo valor de gris.

La contribución a la iluminación de la cuadrícula principal de cada nodo se puede expresar matemáticamente como:

$$E_{interpolada} = E_{nodos} + E_{internodos} = E_{nodos} + \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{c=1}^{529} w_c^i n_c^i}{L^2} \quad \text{Ecuación 6.2.1}$$

Donde el primer sumando es la iluminación referida al plano de nodos tal y como se ha calculado hasta el momento y el segundo sumando es la contribución de los puntos internodos.

La contribución internodos es igual a un sumatorio que contempla los 8 internodos que rodean a cada nodo. De cada uno de ellos, se consideran las 529 celdas angulares pesadas por un factor w_c^i que depende de la distancia de los internodos al centro de la cuadrícula principal. Los inter-nodos son clasificados en dos tipos según su distancia al nodo al que corresponden (Fig. 6.2.11).

Finalmente, n_c^i es el flujo expresado como suma de valores de gris dentro de la celda c para el registro i-ésimo. Este valor es combinado con la lectura del luxómetro y la lectura del número total de niveles de gris que contiene cada registro para obtener la cantidad porcentual de flujo luminoso a propagar desde cada celda.

6.- Resultados experimentales

El peso de las celdas se ha calculado teniendo en cuenta la superposición de las cuadrículas asociadas de cada inter-nodo con la cuadrícula principal del nodo al que rodean. La superposición de las cuadrículas corresponde también a una superposición de celdas angulares. La superposición depende del tipo de inter-nodo que se analice:

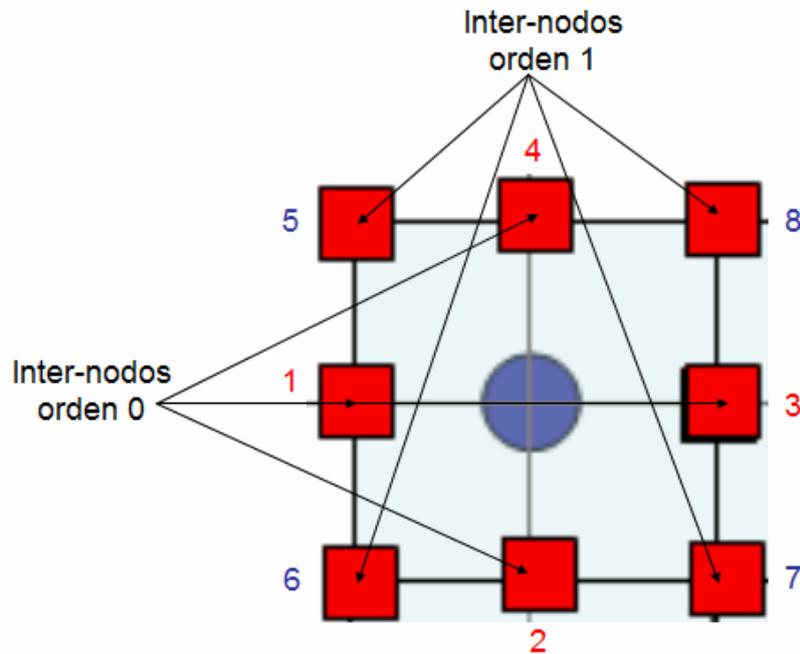


Fig 6.2.11 Esquema de los dos tipos de inter-nodos existentes por cada nodo. Los inter-nodos de orden 0 se encuentran a una distancia L del nodo mientras, que los inter-nodos de orden 1 se sitúan a una distancia $\sqrt{2}L$.

La superposición de cuadrículas se muestra en la figura 6.2.12, donde se ha empleado por simplicidad la superposición asociada a solo dos tipos de inter-nodos. En este caso, se representa la superposición de los inter-nodos 1 y 5 con la cuadrícula principal del nodo.

La figura 6.2.12 representa las cuadrículas asociadas a los internodos 1 y 5, que se superponen en la cuadrícula principal de un nodo al ser propagadas en P0. De cada registro fotométrico, ciertas celdas angulares corresponden a cuadrículas que se superponen al ser propagadas sobre P0.

La celda central de cada registro es mostrada en amarillo. Las celdas angulares referidas a las cuadrículas cuyo centro geométrico esta situado a una distancia L del centro de la cuadrícula principal del nodo se muestran en naranja. Finalmente, las celdas angulares referidas a las cuadrículas cuya distancia es $\sqrt{2}L$ son mostradas en rojo.

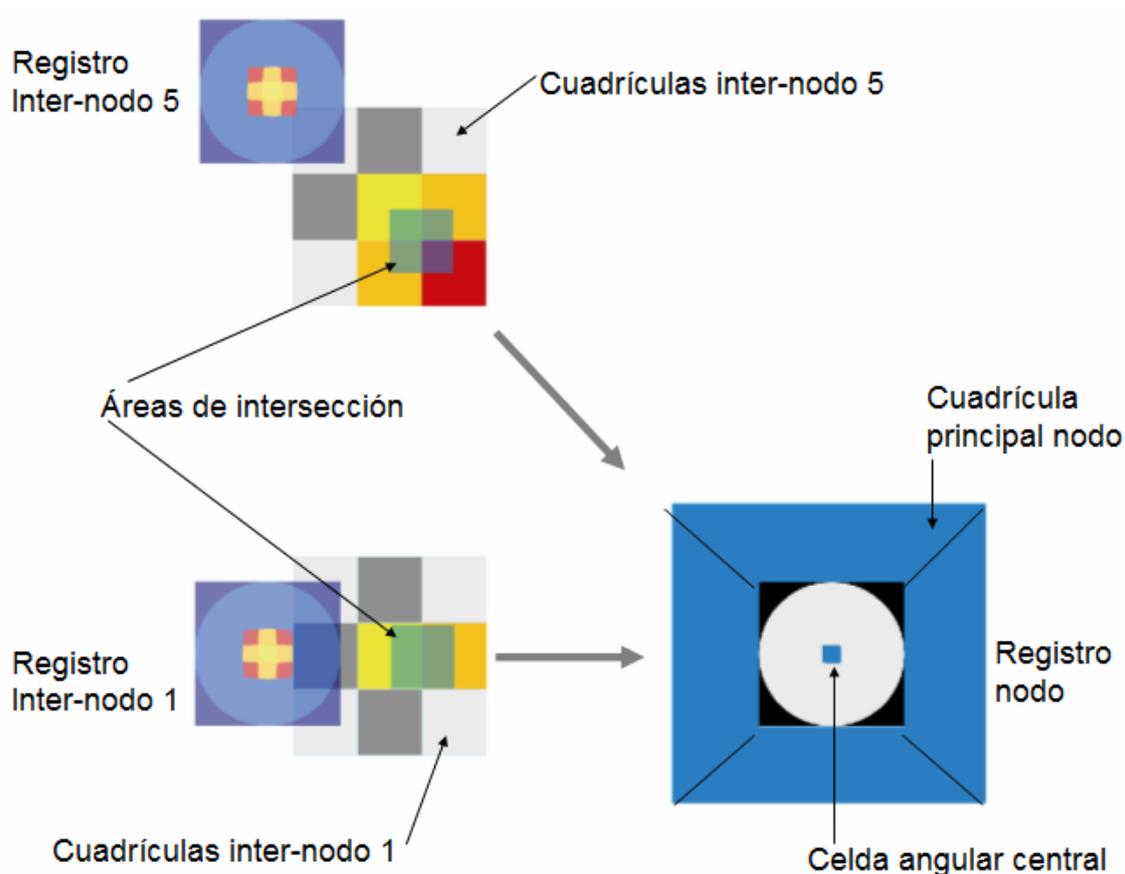


Fig 6.2.12 Esquema de representación de las cuadrículas que se superponen en la cuadrícula principal de un nodo. De cada registro fotométrico, ciertas celdas angulares corresponden a cuadrículas que se superponen al ser propagadas sobre P0. Las cuadrículas que se intersecan se representan en color y sombreadas en azul. Se identifica que parte de cada cuadrícula es finalmente proyectada sobre la misma superficie de la cuadrícula principal del nodo.

Se ha optado por la convención de asociar una denominación a cada celda angular. De este modo, a la celda angular central se le ha notado como celda de orden 0, las celdas naranjas son celdas de orden 1 y finalmente las rojas son de orden 2. Según esta convención, las cuadrículas referenciadas a cada internodo también son notadas como cuadrículas de orden 0, 1 y 2 y están representadas en los mismos colores.

La figura 6.2.13 representa un esquema donde se puede ver claramente qué área de cada cuadrícula es finalmente propagada a la cuadrícula principal de cada nodo.

6.- Resultados experimentales

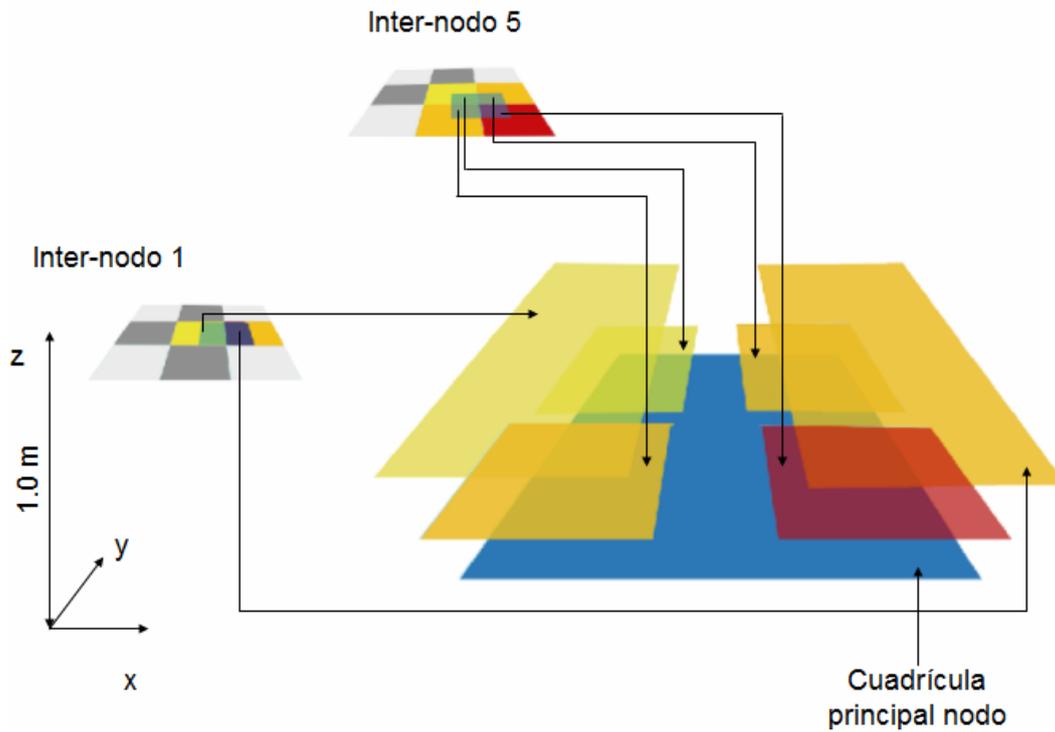


Fig 6.2.13 Representación de las áreas de las cuadrículas asociadas a los internodos 1 y 5 que se superponen con la cuadrícula principal del nodo durante el proceso de propagación al plano de referencia P0.

La superposición de cuadrículas para la propagación desde P10 se puede resumir en la siguiente tabla 6.2.10:

Orden cuadrícula	Inter-nodo orden 0 (4 inter-nodos)			Inter-nodo orden 1		
	% de área	#	# inter-nodos orden 0	% de área	#	# inter-nodos orden 1
0	50	1	4	25	1	4
1	50	1		25	2	
2	---	---		25	1	

Tabla 6.2.10

La tabla 6.2.10 representa, para cada orden de inter-nodo, qué porcentaje de área y frecuencia se superponen las cuadrículas de distintos órdenes con la cuadrícula principal del nodo. Se calcula el porcentaje medio de intersección como:

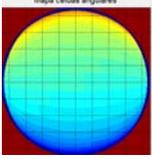
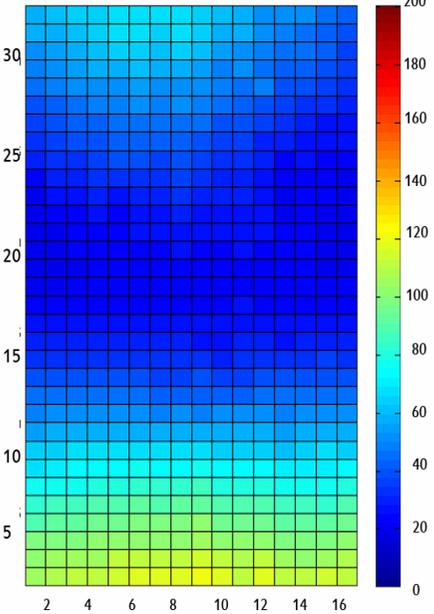
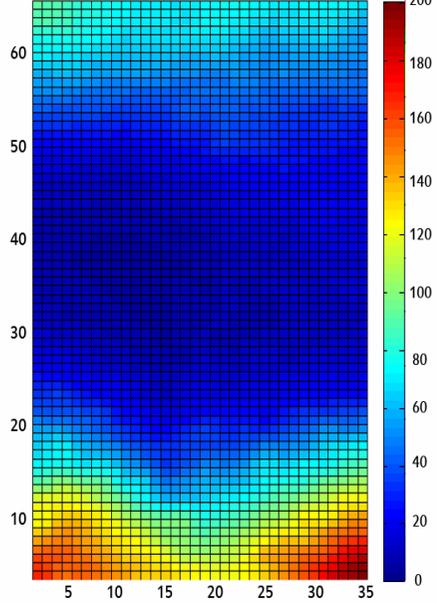
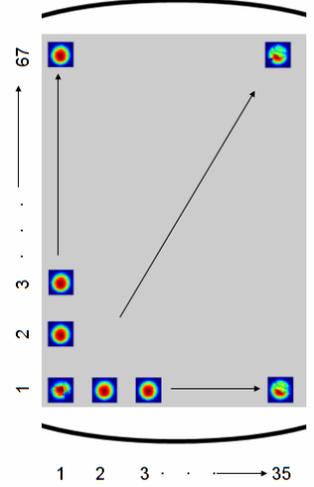
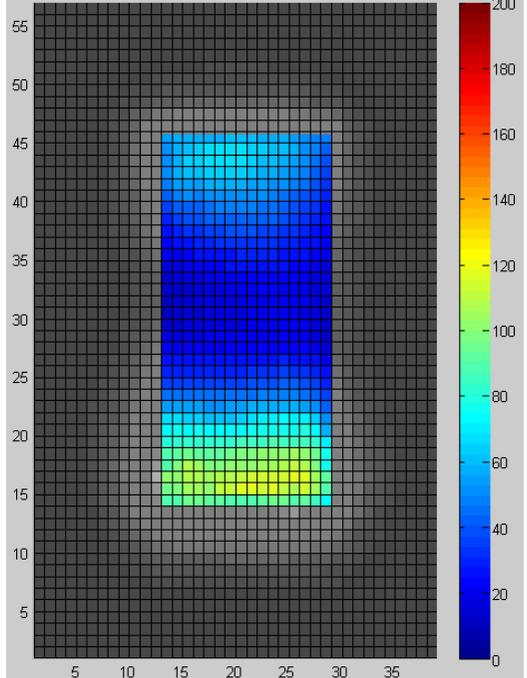
$$\bar{S} = \frac{4 \times 50\% + 4 \times 50\% + 4 \times 25\% + 8 \times 25\% + 4 \times 25\%}{24} = 33\% \quad \text{Ecuación 6.2.2}$$

6.- Resultados experimentales

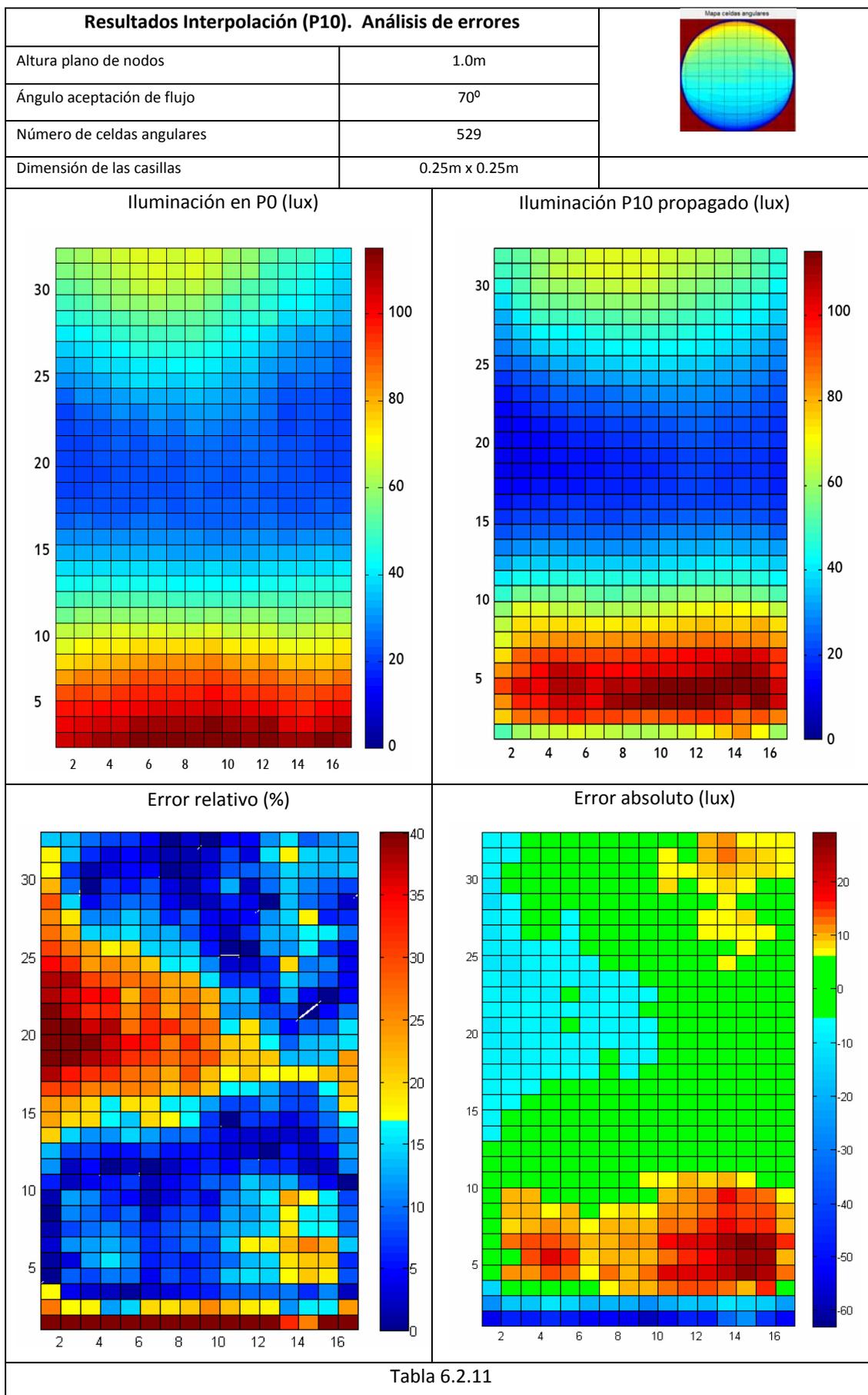
Dado que el flujo contenido en cada celda angular se ha considerado distribuido homogéneamente en los registros asociados a los inter-nodos, el valor del factor w_c^i ha sido finalmente la cantidad de área promedio que se superpone en cada cuadrícula principal de los nodos. Por tanto, la interpolación actúa como un factor de proporcionalidad que varía en cada nodo según el valor de iluminación y la distribución geométrica asociada.

En las siguientes páginas, se presentan las gráficas de resultados experimentales aplicando la interpolación analizada anteriormente.

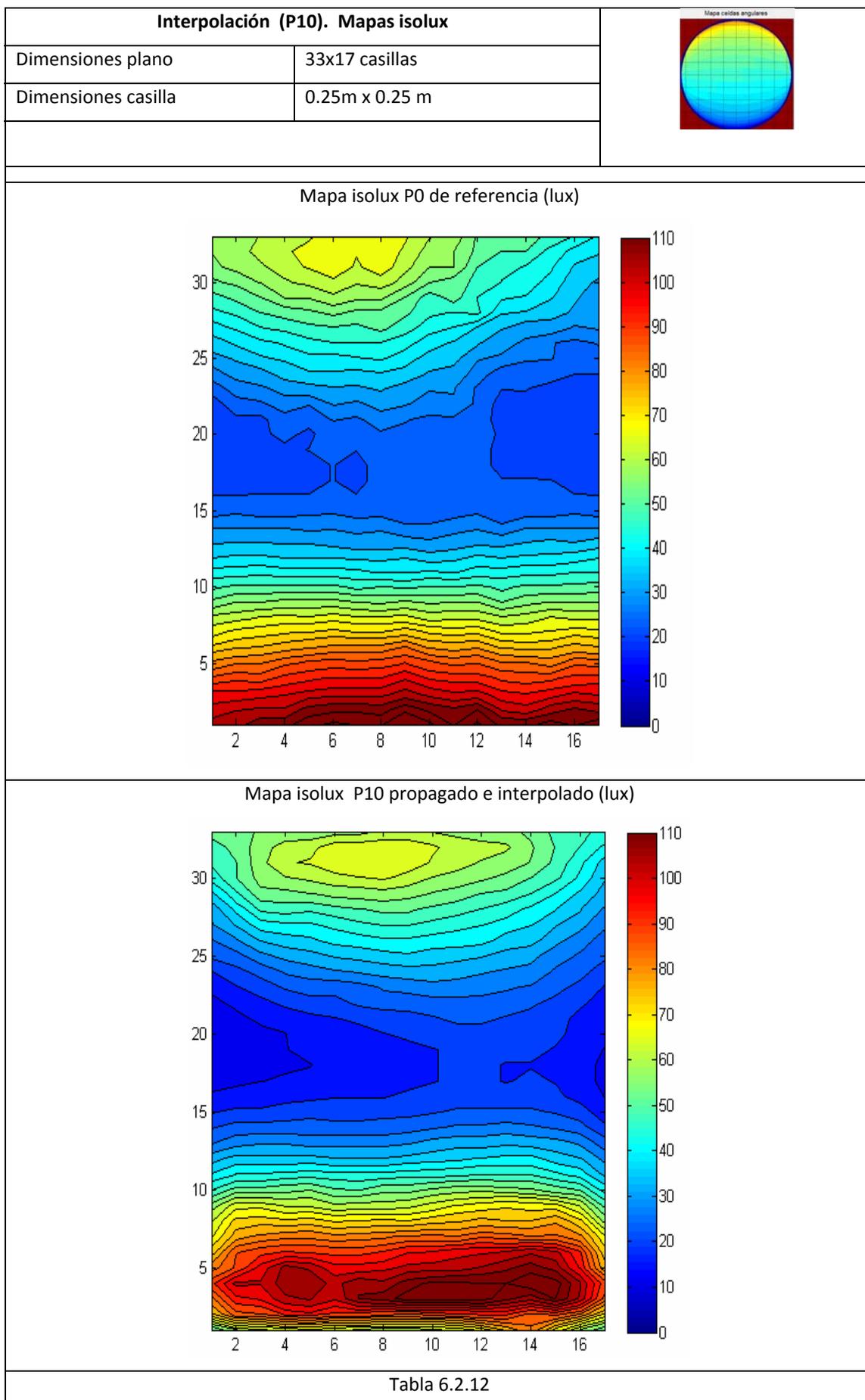
6.- Resultados experimentales

Resultados en campo. Interpolación P10			
Altura plano de nodos	1.0m		
Ángulo aceptación de flujo	70°		
Número de celdas angulares	529		
Dimensión de las casillas 0.25m x 0.25m	Dimensión de las casillas 0.125m x 0.125m	Dimensión de las casillas 0.25m x 0.25m	
a) P0 E (lux)	b) P10 interpolado		c) P10p interpolado E (lux)
	E (lux)	Registros fotométricos	
			
Tabla 6.2.10			

6.- Resultados experimentales



6.- Resultados experimentales



Discusión de resultados

Las tablas 6.2.10, 6.2.11 y 6.2.12 muestran los resultados de la interpolación aplicada a las medidas experimentales en campo para el plano P10. En la tabla 6.2.10 se muestra la representación de los datos de medida. Cada casilla simboliza un área de medida correspondiente al muestreo establecido ($0.125 \times 0.125 \text{ m}^2$) para P10 y ($0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$) para P0.

La primera gráfica a) vuelve a mostrar la medida de la iluminación de referencia en P0 medida con el luxómetro. La segunda gráfica b) muestra la medida de la iluminación realizada con el luxómetro y la representación matricial de los registros fotométricos en P10 y finalmente, la gráfica c) muestra el resultado de la propagación teniendo en cuenta el proceso de interpolación.

La zona gris corresponde a la propagación de flujo luminoso en direcciones que no intersectan P0. En este caso, y dado que los puntos inter nodos solo afectan a la cuadrícula principal de cada nodo, la superficie de la zona gris no aumenta. Como se observa, ahora los datos de P10 propagado presentan un mayor valor de iluminación que en la tabla 6.2.6. El máximo valor alcanzado es 118 lux. Este es un valor solo un 1.7% menor al registrado en los con respecto al plano de referencia P0.

Nuevamente existe una similitud entre las geometrías de la distribución de iluminación en P0 y P10 propagado interpolado. La cuantificación de dicha similitud geométrica se calcula en la tabla 6.2.11 correspondiente al análisis de errores relativo y absoluto.

Análisis del error relativo

El error relativo es representado para cada punto como la razón en valor absoluto entre los datos de P10 propagado y P0 en %.

El valor promedio del error relativo es, después de ser interpolada la medida, de un 14.6 %. Presenta una reducción del 16% con respecto a los resultados que no han sido interpolados, donde el error relativo promedio era del 30%. Además, el valor promedio interpolado es inferior al máximo debido a los errores de medida (16.4%) analizados en la tabla 6.2.9.

6.- Resultados experimentales

El color amarillo en la escala de valores de % se refiere al 16.4% de error relativo que puede cometerse por acumulación de errores en la medida. En tonos azules se representan las zonas de P10 propagado con un error relativo inferior y en tonos naranja-rojizos las zonas de P10 propagado con un error relativo superior.

Se detectan valores superiores al máximo analizado en los bordes debido al efecto de falta de medida cooperativa en dichas zonas. Igualmente, aparecen puntos en las esquina de la farola 1 donde el error relativo ha aumentado. Este efecto es consecuencia de las aproximaciones realizadas en la interpolación donde las celdas angulares han sido consideradas como uniformes. Esto, unido al hecho de que en estas zonas aparecen con mayor facilidad zonas de saturación, provoca una propagación mayor de cantidad de flujo luminoso de la que se debería en las cuadrículas centrales de los registros asociados a esta zona.

El 62% de los puntos de medida presentan valores inferiores al error máximo de medida que podría cometerse, atendiendo a la tabla 6.2.11. En la figura b), que representa los datos de iluminación registrados en P10, se puede comprobar cómo la zona donde el error relativo alcanza valores puntuales del 40% es la zona donde se registran valores muy bajos de iluminación en torno a [0-5] lux. En esta zona, una variación de 0.6 lux será contabilizada por el luxómetro como 1lux, ya que es la máxima sensibilidad que presenta. Esto favorece la aparición de valores de error relativo importante. Sin embargo, la diferencia en valor absoluto ha mejorado notablemente, como se ve en el siguiente apartado.

Análisis del error absoluto

La representación del valor absoluto se ha calculado y se ha representado como la diferencia entre los datos interpolados de P10 propagado y P0 y se representa en unidades de iluminación (Lux).

El valor promedio del error relativo en valor absoluto es de 7.5 lux. Un 63% de los valores se sitúa dentro de los valores promedio ± 7.5 lux y el 81% de los puntos se encuentran en un rango de ± 10 lux.

Los datos del error absoluto muestran también como la subestima que presentaban los resultados a partir de la propagación de P10 sin interpolar han mejorado sustancialmente, dejando una representación de la diferencia más centrada en torno a cero.

6.- Resultados experimentales

Las diferencias más importantes se encuentran nuevamente en los bordes, sobre todo en el inferior donde las diferencias llegan a ser de hasta 60 lux, aunque no se debe olvidar que esta zona presenta una menor contribución de la medida cooperativa entre nodos. Esto, sumado al insuficiente muestreo, se traduce en grandes diferencias en la determinación de la iluminación. Sería necesario aumentar el plano de nodos para tener una correcta evaluación de las zonas de borde.

Se observa un error absoluto por exceso en torno a la esquina inferior izquierda, derecha y la esquina superior derecha. Estas posiciones corresponden a las ubicaciones de las farolas, como se ha analizado en el apartado del error relativo. Las mayores diferencias aparecen en la esquina inferior derecha, donde la farola 1 provoca un efecto de saturación en los registros situados en torno a ella. El resultado es el mismo que ya se analizó en el apartado de laboratorio. En efecto, la saturación provoca que el flujo luminoso no sea propagado correctamente en las direcciones adecuadas, y que las celdas angulares saturadas, normalmente las centrales y correspondientes a ángulos de elevación bajos, contribuyan con mayor relevancia de la real a la obtención de la iluminación sobre P0.

En comparación con los resultados no interpolados, la estrategia de interpolación propuesta avanza en el camino adecuado hacia la obtención de los mapas isolux a alturas del plano de nodos superiores a 0.2m. A continuación se analizan los resultados de este tipo de representación.

Análisis de los mapas isolux

Finalmente, la tabla 6.2.12 muestra los mapas isolux correspondientes a las medidas realizadas con el luxómetro en P0 y el mapa isolux obtenido a partir de los datos de propagación desde el plano de nodos P10 interpolados.

El mapa isolux obtenido a partir de la propagación interpolada presenta una geometría de líneas isolux muy semejante a las curvas isolux del plano de referencia. En esta ocasión, aparecen diferencias en la forma de la distribución en las zonas superior e inferior del mapa. Este hecho es sobre todo debido al efecto de la inexistencia de medida cooperativa entre nodos, ya que son los últimos puntos de medida de P10.

Los valores de las curvas isolux han aumentado en todo el mapa isolux con respecto a

6.- Resultados experimentales

los resultados mostrados no interpolados. En general se comprueba cómo el nuevo mapa isolux es prácticamente idéntico al mapa isolux de referencia salvo en las zonas reveladas por el análisis de error relativo y absoluto.

Las zonas relativas a las farolas 1, 2 y 4 presentan valores ligeramente superiores a los esperados debido a la saturación de los registros. En esta ocasión, la cámara se sitúa más cerca de las farolas que en P10, por lo que la saturación provoca que una mayor proporción del flujo luminoso captado en los registros cercanos a las farolas sea propagado en ángulos de elevación de bajos. Esto provoca que se acumule una mayor cantidad de energía, lo que desemboca en un mayor valor de iluminación.

Las zonas intermedias de los mapas isolux presentan una gran similitud entre ellas. de nuevo, las curvas isolux de P10 propagado e interpolado presentan valores inferiores a los esperados, aunque esta diferencia es menor que en los resultados donde no se ha tenido en cuenta la interpolación. La estructura de las curvas presenta dos zonas con una baja iluminación en la parte izquierda y derecha de la zona central del mapa isolux, tal como indica el mapa isolux P0.

También en la zona central existe un área de unión de curvas isolux referentes a los niveles de 30lux que no habían sido reproducidas en los apartados anteriores. Este detalle realza más aún la similitud entre los mapas de iluminación de referencia y el propagado e interpolado.

La tabla 6.2.13 muestra un resumen cuantitativo de las diferencias obtenidas mediante el proceso de la generación de puntos inter nodos para el plano de nodos P10

Planos de análisis	Error relativo promedio	% casillas	Error absoluto promedio	% casillas
		< 16.4%		± 14.5 lux ó ±7.5 lux
P10p	30.0 %	13%	14.5 lux	27%
P10p (i-n)	14.6 %	62%	7.5 lux	63 %

Tabla 6.2.13

El error relativo medio para la propagación desde P10 sin tener en cuenta la generación de internodos es de un 30%, valor que se reduce a la mitad con la generación de inter nodos. El porcentaje de casillas que presentan un error relativo menor al máximo que

puede cometerse en la medida aumenta desde el 13% hasta el 62% cuando se tienen en cuenta los puntos inter nodos. También queda minimizado el error absoluto promedio que desciende a la mitad, desde 14.5 lux hasta 7.5 lux. Finalmente, el número de casillas del plano P10 propagado que se sitúan dentro de los márgenes del error absoluto mejora notablemente, pasando de un 27% para los resultados obtenidos sin la generación de inter nodos hasta el 63% donde sí se han tenido en cuenta los internodos.

Conclusiones sobre las medidas en campo inter nodos (P10).

A modo de resumen de las medidas en campo para el plano P10 con generación de inter nodos, se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- i) La generación inter nodos ha permitido validar la estrategia de medida estudiada en el capítulo 4 en un entorno de medida en el que las fuentes de luz no son controladas, como es el caso de una instalación de alumbrado público para un plano de nodos situado a 1.0m del plano de referencia.
- ii) Los resultados obtenidos para el mapa isolux demuestran que es posible obtener la reconstrucción del mapa isolux sobre P0 a partir de medidas en un plano de nodos situado a 1.0m con ayuda de la generación de puntos inter nodos.
- iii) La interpolación propuesta ha resultado satisfactoria en la obtención del mapa de iluminación y plantea una mejora importante en la determinación de los mapas de iluminación desde diferentes distancias del plano de nodos.
- iv) La interpolación mejora el resultado en la obtención del mapa isolux en las zonas de baja iluminación [0-5] lux donde el error absoluto y relativo han sido minimizados.
- v) Los resultados obtenidos en campo para P10, junto con la estrategia de la generación de inter nodos, demuestran que las medidas experimentales pueden realizarse de forma dinámica, puesto que todos los parámetros de medida son reproducibles en una medida en movimiento.

Evaluación de la calidad de la instalación

En base a los resultados obtenidos, se puede estimar la calidad de la instalación de alumbrado pública correspondiente al entorno de medida de campo.

La calle donde se han realizado las medidas en campo es una calle normalizada de tipo E2 según la normativa europea. Como se comentó en el apartado 3.2.1, la calidad de la instalación se cuantifica según el grado de uniformidad media mínima que debe presentar la instalación. La uniformidad media se calcula como el cociente de la iluminación mínima y la iluminación media de todos los datos registrados.

La siguiente tabla muestra los resultados acerca de la calidad de la instalación de alumbrado público según la uniformidad obtenida en cada uno de los casos estudiados a lo largo del apartado correspondiente a los resultados experimentales en campo:

	Valor mínimo por normativa	P0	P02p	P10p	P10p (i-n)	Normativa
E _{min} (lux)	1.5	19.0	15.6	8.0	12.4	21
E _{media} (lux)	7.5	50.2	46.8	35.7	47.8	46
U _{media}	0.4	0.38	0.33	0.22	0.26	0.42

Tabla 6.2.14

La tabla 6.2.14 expone los valores de iluminación mínima, medida y uniformidad para una calle tipo E2 [ITC-2008]. Las columnas representan los valores mínimo y medio de iluminación, así como la uniformidad en los distintos casos contemplados en el apartado de medidas en campo, a saber, para el plano de referencia P0 y para los datos propagados a partir de P02, P10 y P10 con el uso de la generación inter nodos P10p(i-n). Finalmente, la última columna muestra también los datos con respecto a la medida que se hubiera realizado siguiendo las indicaciones de la normativa europea, es decir, seleccionando 33 puntos de medida de P0 separados 0.85m en el sentido longitudinal de la medida y 1.5m en el sentido transversal.

Mientras que el plano P0 presenta un muestreo de 33 filas y 17 columnas, lo que equivale a 561 puntos de medida, el muestreo según la normativa europea es de 11 filas y 3 columnas. En este sentido, los valores obtenidos sobre P0 son más realistas de cara a la cuantificación de la uniformidad de la iluminación. El elevado número de medidas lo hace

6.- Resultados experimentales

impracticable y por este motivo la normativa contempla métodos alternativos de realización de las medidas para minimizar el número de puntos de muestreo.

En verde se muestran los valores que están de acuerdo con los mínimos exigidos por la normativa como valor nominal. En rojo se muestran los valores que no alcanzan los valores mínimos exigidos por la normativa.

Con respecto a P0 las variaciones de los valores mínimos son superiores al 10% entre todos los casos salvo para la comparativa entre P0 y el valor mínimo según la normativa, en cuanto al valor promedio, las diferencias son menores al 10% excepto para P10p.

Ninguno de los mapas isolux referidos a las medidas experimentales proporciona una uniformidad de 0.4, la mínima exigida por la norma. Las diferencias entre los resultados de la propagación y P0 se deben principalmente a las diferencias en la determinación de los valores mínimos de los mapas isolux.

Si se representan los mapas isolux de P0 y el que se obtendría por extrapolación a partir de los 33 puntos que se contemplan mediante el método de la norma, se tendría el resultado mostrado en la figura 6.2.13:

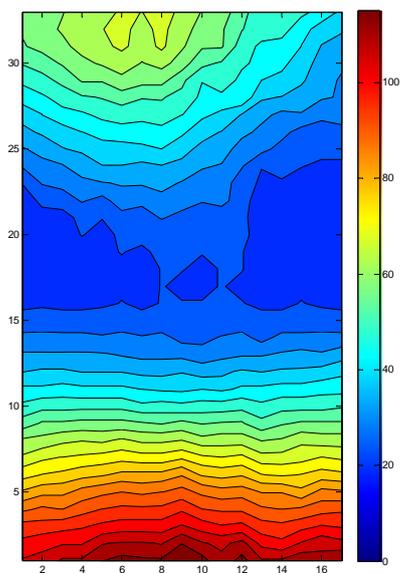


Fig 6.2.13 a) Mapa isolux P0

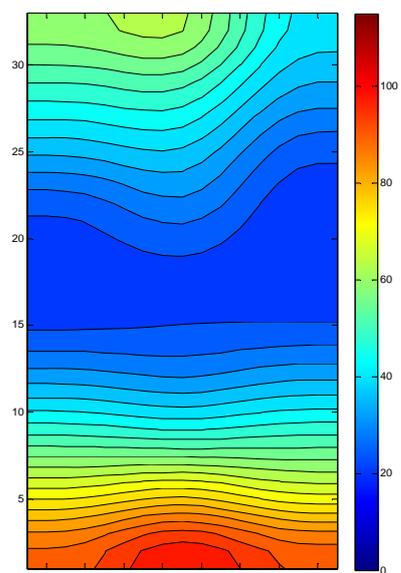


Fig 6.2.13 b) Mapa isolux extrapolado a partir de los datos de medida según normativa.

6.- Resultados experimentales

Según el gráfico de la figura 6.2.13 b, el mapa isolux extrapolado a partir de los datos de medida según la normativa presenta una geometría muy similar a la del mapa de referencia P0, así como a los mapas obtenidos según los métodos de propagación desde distintos planos de nodos.

Respecto a los valores absolutos, las diferencias se acentúan sobre todo en las zonas de valores más altos. El mapa isolux en P0 registra valores de iluminación mayores que los extrapolados según la normativa. Los valores mínimos se mantienen prácticamente igual en ambos casos. Según estos datos, la iluminación promedio será menor en el mapa isolux extrapolado, y dado que el mínimo es muy similar al encontrado en P0, la uniformidad será mayor.

La norma establece puntos de medida alejados de las fuentes de luz. Debido a esta condición, los valores más elevados de iluminación no son registrados, de forma que la uniformidad se encuentra sobreestimada con respecto a las medidas de referencia.

Si se efectúa el cálculo de la calidad de la instalación teniendo en cuenta el área de medida establecida por la norma para los mapas isolux de referencia y propagados, los resultados cambian según muestra la tabla 6.2.14.

	Valor mínimo por normativa	P0	P02p	P10p	P10p (i-n)	Normativa
E _{min} (lux)	1.5	21	18.15	10	13.5	21
E _{media} (lux)	7.5	44.35	41.60	34.45	43.1	46
U _{media}	0.4	0.47	0.44	0.29	0.31	0.42

Tabla 6.2.15

En este caso, tanto el mapa de referencia como el propagado desde P02 son coincidentes con los resultados de la norma. En cuanto a los resultados hallados para la propagación desde P10 interpolado, la estimación de la calidad de la instalación sigue situándose en valores inferiores a 0.4, debido principalmente al error relativo importante que se encuentra en las zonas de baja iluminación, lo cual disminuye notablemente la uniformidad y por tanto el resultado final sobre la instalación de alumbrado. Si se mejora la medida en las zonas de baja iluminación, la propagación desde P10 también proporcionará valores adecuados sobre la evaluación de la calidad de las instalaciones de alumbrado público.

Capítulo 7

Conclusiones

A continuación, se enumeran las conclusiones obtenidas durante todo el desarrollo del texto de esta tesis doctoral.

- 1. Se ha desarrollado un nuevo algoritmo de propagación de flujo luminoso para la realización de medidas fotométricas de sistemas de alumbrado público.**

El uso de la fotometría, en combinación con el conocimiento del diseño de los sistemas ópticos gran angular, ha permitido desarrollar una estrategia de medida que permite conocer tanto la cantidad total de iluminación como también la dirección de procedencia del flujo luminoso que la provoca en cualquier punto de medida en áreas de dimensiones importantes.

El algoritmo desarrollado procesa la información fotométrica permitiendo conocer la iluminación en un plano de interés a partir de la medida indirecta en un plano de nodos situado a una distancia determinada del primero.

- 2. Se han caracterizado los elementos ópticos, electrónicos y mecánicos necesarios para la implementación de la estrategia de medida.**

Con el objetivo de garantizar unos márgenes de error experimentales correctos, se ha efectuado la caracterización de todos los elementos involucrados en la medida, a saber, el

luxómetro, la cámara CMOS y el objetivo gran angular.

Las pruebas de caracterización han permitido conocer en profundidad el comportamiento de los elementos y establecer un protocolo de ajuste para futuros dispositivos a desarrollar en caso de que las especificaciones de los elementos cambien en algún sentido.

Los parámetros caracterizados para cada elemento han sido:

Luxómetro

- i) El parámetro f2 correspondiente a la respuesta direccional del cabezal del luxómetro presentó valores inferiores a 1.5%, valores aptos según la normativa europea.
- ii) El parámetro f3 correspondiente a la linealidad del cabezal del luxómetro presentó un valor inferior a 0.2%, valor apto según la normativa europea.
- iii) El parámetro f1 correspondiente a la respuesta espectral del cabezal del luxómetro presentó un valor inferior a 0.23%, valor apto según la normativa europea.
- iv) El parámetro f5 correspondiente a la dependencia con la temperatura del cabezal del luxómetro presentó un valor inferior a 0.01%, valor apto según la normativa europea.
- v) El parámetro f4 correspondiente a la fatiga del cabezal del luxómetro presentó un valor inferior a 0.002%, valor apto según la normativa europea.
- vi) El parámetro f6 correspondiente a la linealidad del cabezal del luxómetro presentó un valor inferior a 0.1%, valor apto según la normativa europea.

Cámara CMOS

- i) Se ha caracterizado la linealidad de la cámara CMOS por dos métodos distintos, en función de la luminancia y en función del tiempo de exposición. Para ambos métodos, se establecieron los límites de linealidad.
- ii) Se ha caracterizado la respuesta espectral de la cámara CMOS evaluando las diferencias con la respuesta espectral del sistema visual humano.
- iii) Se han analizado los distintos tipos de ruido asociados al sensor de la cámara CMOS, ruido patrón, aleatorio y en bandas.
- iv) Se ha cuantificado el ruido presente en el sensor para eliminar su efecto durante la medida fotométrica.

Objetivo gran angular

- i) Se ha caracterizado la posición de enfoque a infinito del objetivo gran angular.
- ii) Se ha caracterizado la distorsión del objetivo gran angular para encontrar la correspondencia entre dirección de incidencia de la luz y píxeles asociados.
- iii) Se ha caracterizado la transmitancia del objetivo gran angular para cada dirección de incidencia de la luz.

3. Se ha establecido un criterio de saturación para limitar la cantidad de píxeles saturados en cada registro fotométrico.

Se ha definido como valor máximo de píxeles saturados el 2% de la cantidad total de píxeles presentes en un registro fotométrico.

El criterio de saturación optimiza el rango dinámico en cada uno de los registros fotométricos.

El criterio de saturación minimiza la pérdida de información referida a la luz procedente de las fuentes primarias de luz, al mismo tiempo que no enmascara la información referida a la luz procedente de las fuentes secundarias de luz.

4. Se ha detectado y analizado el problema de las zonas saturadas en los registros fotométricos durante el análisis del error absoluto.

Las zonas saturadas fueron detectadas en primera instancia en las medidas experimentales de laboratorio y más tarde en las medidas experimentales en campo.

Según los resultados obtenidos a partir de un 15% de registros saturados se detectan sobreestimaciones en los valores de la iluminación. La saturación de los registros fotométricos provoca un aumento del error absoluto de la medida.

El comportamiento del error absoluto es el mismo tanto en laboratorio como en campo.

5. Se ha detectado y analizado el problema de las zonas con bajo nivel de iluminación en la representación del error relativo

7.- Conclusiones

El luxómetro empleado en las medidas experimentales presenta una sensibilidad insuficiente para la determinación correcta de los valores de iluminación en torno a [0-20] lux.

La falta de sensibilidad en la determinación de la iluminación en las zonas que presentan valores bajos hace aumentar significativamente el error relativo de las medidas.

El comportamiento del error relativo en las zonas de baja iluminación es el mismo tanto en laboratorio como en campo.

6. Se han obtenido satisfactoriamente los mapas isolux de entornos de medida de laboratorio y campo.

Los mapas isolux han sido obtenidos en dos entornos de medida distintos, en laboratorio empleando una fuente de luz controlada y en campo, donde los sistemas de alumbrado no son controlados.

La geometría de los mapas isolux propagados presenta grandes similitudes con respecto a los mapas isolux de referencia tanto en laboratorio como en campo respectivamente.

En laboratorio se ha obtenido el mapa isolux para una fuente de luz tipo LED blanco lambertiano a partir de medidas de un plano de nodos situado a 0.2m según la normativa europea.

En campo, se ha obtenido el mapa isolux a partir de medidas realizadas en un plano de nodos situado a 0.2m del plano de referencia según la normativa europea.

El error relativo promedio para P02 es del 6.6% y el error absoluto promedio es de 3.8Lux. El mapa isolux propagado desde P02 presenta un 94% de los valores de iluminación entre ± 3.8 lux.

Con el fin de generalizar el proceso de medida a cualquier plano de nodos, se ha obtenido el mapa isolux desde un plano de nodos situado a 1.0m del plano de referencia. Las medidas en campo para el plano de nodos P10 han sido interpoladas mediante la generación artificial de puntos internodos.

7.- Conclusiones

El error relativo promedio para P10p (i-n) es del 14.6% y el error absoluto promedio es de 7.5Lux. El mapa isolux propagado desde P02 presenta un 63% de los valores de iluminación entre ± 7.5 lux.

La evaluación de la calidad de la instalación de alumbrado difiere entre la metodología hallada en la normativa y el resultado según los datos del plano de referencia P0.

La evaluación de la calidad de la instalación de alumbrado es subestimada por el proceso de propagación.

La evaluación de la calidad de la instalación es más realista cuanto menor sea la distancia entre el plano de nodos y el plano de referencia.

7. Se ha propuesto una estrategia de interpolación de datos para la medida en P10 .

Al aumentar la distancia entre el plano de nodos y el plano de referencia, la condición de continuidad establecida en el capítulo 4 para cuadrículas de 0.25x0.25 es insuficiente.

Se ha propuesto una estrategia que consiste en la interpolación del plano de nodos a partir de la generación artificial de puntos internodos.

La estrategia de generación de inter nodos propuesta hace uso de los valores de iluminación medidos por el luxómetro y los registros captados por la cámara en cada nodo, y los asigna a 8 puntos que rodean el nodo. Cada uno de estos 8 puntos es denominado inter nodo y trabaja como un registro más con el mismo número de celdas angulares del nodo al que está asociado.

Los resultados de la generación de inter nodos han sido satisfactorios, mejorando hasta en un 35% los valores obtenidos sin el proceso de generación de inter nodos.

8. Las medidas de los mapas de iluminación son válidas durante un período de tiempo determinado.

7.- Conclusiones

Debido a la gran variabilidad que presentan los sistemas de alumbrado público, y los resultados mostrados para dos noches distintas en el capítulo 6 acerca de la iluminación proporcionada por el mismo sistema de alumbrado público, se concluye que la obtención del mapa isolux es válida en un espacio de tiempo acotado.

Los mapas isolux, a la vista de las medidas de control de estabilidad de los sistemas de alumbrado público, pueden ser válidos durante la noche en la que han sido medidos, ya que no se observó cambio durante más de siete horas de medidas en los 6 fines de semana en los que se llevaron a cabo las medidas experimentales.

9. Se ha demostrado que las medidas pueden realizarse de forma dinámica.

Los resultados de esta tesis doctoral muestran que todos los parámetros geométricos que involucra la medida, así como los elementos utilizados y los cálculos realizados, pueden ser efectuados en movimiento, es decir, dinámicamente.

La estrategia de medida es compatible con la normativa europea que establece una distancia entre el plano de nodos y el plano de referencia no superior a 0.2m.

La estrategia de medida permite contabilizar la contribución por exceso o defecto del vehículo en el que fuese embarcado el dispositivo fotométrico aislando posibles medidas incorrectas.

La medida en movimiento según la estrategia empleada aportaría una mayor densidad de muestreo de la medida fotométrica, permitiendo obtener análisis más exhaustivos de las instalaciones de alumbrado público.

La medida en movimiento según la estrategia de medida empleada aportaría una mayor rapidez en la ejecución de las medidas.

Por tanto, es posible continuar avanzando en la optimización de la estrategia de medida y en el diseño de un dispositivo que realice las medidas de forma dinámica y automatizada.

Capítulo 8

Trabajo futuro

Llegados a este último capítulo y con la perspectiva del estudio teórico, el análisis de las validaciones experimentales y teóricas y la síntesis de las conclusiones, se propone a continuación una serie de aspectos que son considerados como los pasos naturales en la mejora del proyecto presentado en esta memoria de tesis doctoral.

Un trabajo de investigación y de ingeniería como el presente es siempre una propuesta susceptible de mejora. Sin duda, el avance de la técnica y la continua mejora en la línea de la investigación y desarrollo permiten avanzar sin tener una acotación de límite en el horizonte. Sin embargo, en este capítulo se esbozan tres ideas que podrían formar parte en el futuro más inmediato de la línea de mejora del trabajo realizado.

1. Construir un prototipo donde se aumenten y mejoren las capacidades de medida fotométrica.

Un dispositivo que permita realizar medidas en un mayor punto de nodos sería la primera mejora a realizar, puesto que se ha demostrado que a medida que el plano de nodos se aleja del plano de referencia existe un problema en la captación del flujo luminoso vinculado con la densidad de muestreo del plano de nodos.

Otros aspectos a tener en cuenta en un futuro prototipo sería disponer de un luxómetro con menor error y cámaras que presentaran mayor profundidad de bits, así como una mayor frecuencia de trabajo para que permitieran la posibilidad de realizar medidas dinámicas. Esto mejoraría el rango dinámico del equipo permitiendo minimizar el efecto de las zonas quasi-saturadas en los registros cercanos a las fuentes de luz, permitiría obtener mayor información en las zonas poco iluminadas y realizar una propagación del flujo más exacta. Finalmente, al aumentar la frecuencia de trabajo, se obtendrían más medidas por unidad de tiempo, lo que permitiría la posibilidad de abordar con mayores expectativas la realización de la medida dinámica.

2. Implementar los procedimientos de los anexos A y B en la estrategia de medida.

En este segundo punto cabría esperar la incorporación de cámaras digitales a color que permitieran la medida policromática de los entornos de medida así como el uso de los filtros adecuados. El proceso de calibración y caracterización ha sido estudiado ampliamente en otros trabajos de investigación. Este tipo de tareas podrían perfectamente desembocar en un trabajo de tesis doctoral. [Lasarte 2009]

Por otra parte, sería recomendable dotar al futuro equipo de la posibilidad de estar geoposicionado mediante el uso de sistemas de localización GPS, y al mismo tiempo, implementar los sistemas de posicionamiento local como el expuesto en el anexo B. Los sistemas de geoposicionamiento son un sector en auge que cada día presenta más aplicaciones, tanto a nivel de software como hardware. [Apple 2012]

3. Cambio de la tecnología basada en post-procesado de la información a tratamiento en tiempo real.

Esta tesis ha expuesto un método de trabajo en el que los resultados obtenidos y presentados han sido analizados con posterioridad a la realización de las medidaspruebas experimentales. No obstante, el camino hacia la obtención de la información en tiempo real pasa por evitar el procesado en diferido para realizar las conversiones en tiempo real. Dispositivos como las FPGAs son elementos electrónicos que pueden trabajar con sistemas electro-ópticos como el propuesto en esta tesis doctoral, capaces de mostrar la información a través de Internet y en tiempo real. [Foreware 2012]

8.- Trabajo futuro

La tarea inmediata en este sentido sería la programación de las matrices de filtro fotométrico y grabadas previamente en los circuitos basados en FPGAs, para que éstos realizaran la tarea de cálculo de una forma mucho más rápida.

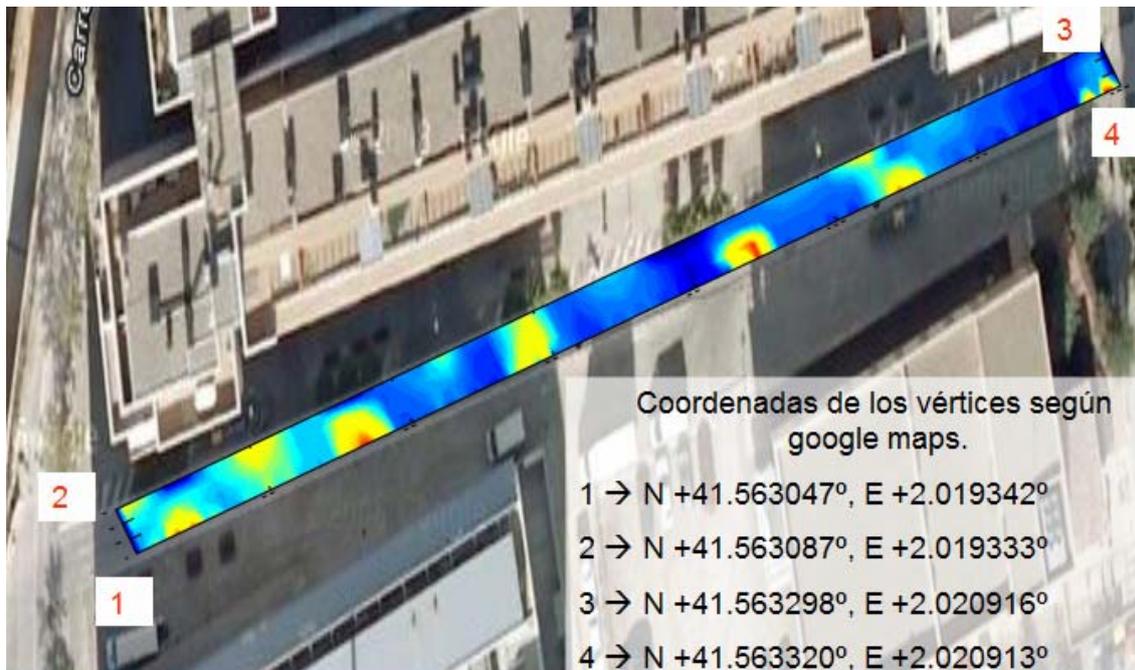


Fig 8.1 Representación virtual de un mapa de iluminación sobrepuesto en la calle Miquel Vives con Rambla de Sant Nebridi en la ciudad de Terrassa. Esta figura representa el mapa isolux que el dispositivo debe poder presentar en un futuro a partir de las medidas realizadas de forma dinámica. Los resultados corresponden a un prueba de viabilidad del proyecto.

ANEXO A

A. Fotometría y medidas policromáticas.

Tal y como se mencionó al comienzo de esta tesis doctoral, el algoritmo de propagación del flujo luminoso debe permitir al dispositivo realizar la medida de la cantidad y distribución geométrica de la luz policromática de entornos variables en sistemas de alumbrado público.

Aunque a nivel experimental, la medida policromática no ha sido implementada, en este anexo se incluye una aproximación de medida policromática.

Durante el capítulo 4, todos los cálculos, deducciones y representaciones contemplados no han tenido en cuenta el espectro de la fuente luminosa. Sin embargo, es posible incorporar la medida espectral en las expresiones generales de los dispositivos involucrados en la medida.

El presente anexo se ha dividido en tres apartados. El primero de ellos contempla el aspecto espectral de la medida y cómo afecta este hecho a la resolución angular de la misma. El segundo punto trata del rango dinámico, valores máximos y mínimos que son posibles obtener y el error asociado según el valor a medir. Finalmente, al igual que ya se vio en 4.1.3, en el tercer punto se analiza la generación de nodos de medida en función de los dos parámetros anteriores, el rango dinámico y el espectral.

A.1. Correcciones fotométricas.

Todos los cálculos, representaciones y razonamientos contemplados en las secciones 4.1 y 4.2 no han tenido en cuenta el aspecto espectral de la medida. Dado que la medida se encuentra en el marco de la fotometría y no la radiometría, es necesario analizar las implicaciones que este hecho supone en la medida. El espectro electromagnético de interés

para la medida es el espectro visible que responde al rango de longitudes de onda situado entre 380nm y 780nm.

Los entornos de medida son espacios que presentan numerosos y diversos tipos de fuentes luminosas. En general, cada tipo de fuente luminosa presenta un espectro electromagnético de emisión diferente, por lo que la medida debe ser capaz de detectar y analizarlos.

Una clasificación del tipo de fuentes luminosas fue realizada en la sección 3.4 del capítulo 3 correspondiente al estado del arte. Los espectros de emisión varían desde los casi monocromáticos como los de las lámparas de sodio de baja presión a los espectros de emisión que contemplan un conjunto mayor de longitudes de onda de emisión como las lámparas fluorescentes, vapor de mercurio o LEDs.



a)



b)

Fig. A1.1.1 Ejemplo de iluminación monocromática y luz blanca. En la figura a) se muestra una calle del municipio Puente de la Reina (Navarra) donde se aprecian las distintas luminarias de vapor de sodio con el color anaranjado característico. En la figura b) se muestra la catedral de Valladolid iluminada con fuentes de luz blanca.

El ojo humano es más sensible a las longitudes de onda centrales del espectro visible. Por consiguiente, para poder medir la iluminación de forma correcta los luxómetros han sido diseñados y calibrados para responder a las mismas longitudes de onda a las que es sensible el sistema visual humano. Dado que en general los componentes electrónicos sensibles a la luz presentan respuestas espectrales diferentes a las del ojo humano, es necesario el uso de filtros compensadores espectrales para la correcta realización de la medida de la cantidad total de iluminación.

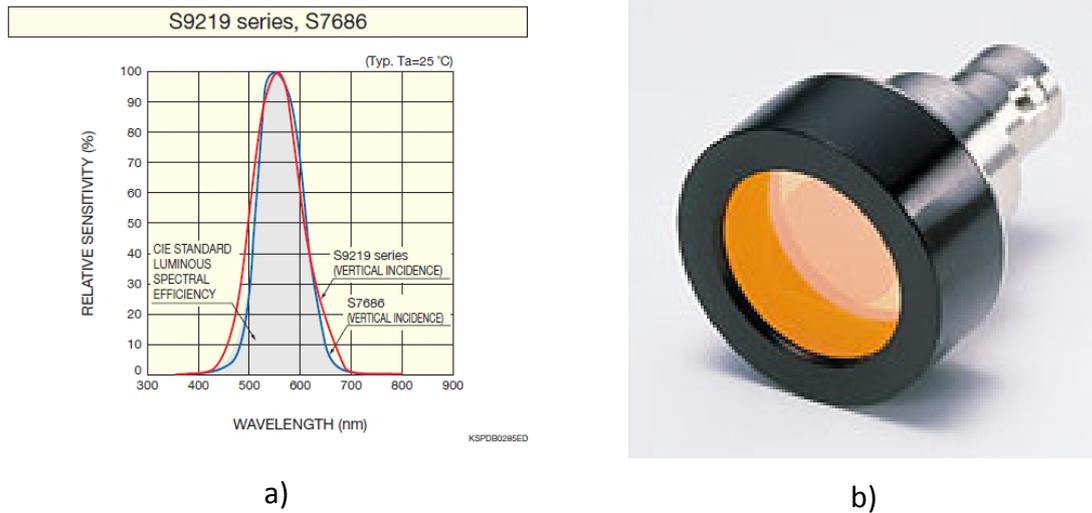


Fig. A.1.2 Respuesta espectral (a) de un sensor cerámico (b) compuesto por un fotodiodo y un filtro compensador espectral, modelo S9219 de Hamamatsu. La respuesta espectral de este sistema es muy similar a la respuesta espectral del ojo humano. [Hamamatsu 2012]

El dispositivo de medida de la iluminación debe poder emplearse en entornos con distintos niveles de iluminación que van desde niveles fotópicos a escotópicos, pero en general la mayor parte de las medidas deben realizarse en niveles de visión mesópico [Deschères 2012], ya que es el valor en que suelen ajustarse las instalaciones de iluminación proporcionados por las fuentes luminosas artificiales. Los niveles de visión se pueden separar de manera cuantitativa según los siguientes valores de luminancia existentes en el entorno de medida.

$$\begin{aligned}
 \text{FOTÓPICO} &\Rightarrow L_v \geq 10 \text{ cd/m}^2 \\
 \text{MESÓPICO} &\Rightarrow 10^{-3} \text{ cd/m}^2 \leq L_v < 10 \text{ cd/m}^2 \\
 \text{ESCOTÓPICO} &\Rightarrow L_v \leq 10^{-3} \text{ cd/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación A.1.1}$$

En visión mesópica los valores de iluminación no corresponden a una oscuridad total, pero tampoco presentan valores de iluminación como los que se pueden registrar a plena luz de día. La información colorimétrica de la escena siempre debe ser tenida en cuenta.

Los filtros compensadores del espectro electromagnético deben tener en cuenta el nivel de visión en el cual se trabaje para adaptar la respuesta espectral de la medida a la del ojo humano en las condiciones de la escena. El uso de los filtros compensadores plantea una desviación de la respuesta espectral de medida con respecto a la teórica, ya que a la práctica,

no resulta posible obtener un filtro exacto que reproduzca la curva de respuesta espectral del ojo para cada nivel de visión. Este hecho se traduce en una desviación en la integral de la curva espectral y por tanto una diferencia en el valor total de iluminación medido con respecto al teórico. No obstante, este es un error que se ha de admitir y cuantificar para tener presente el aspecto no monocromático de la medida.

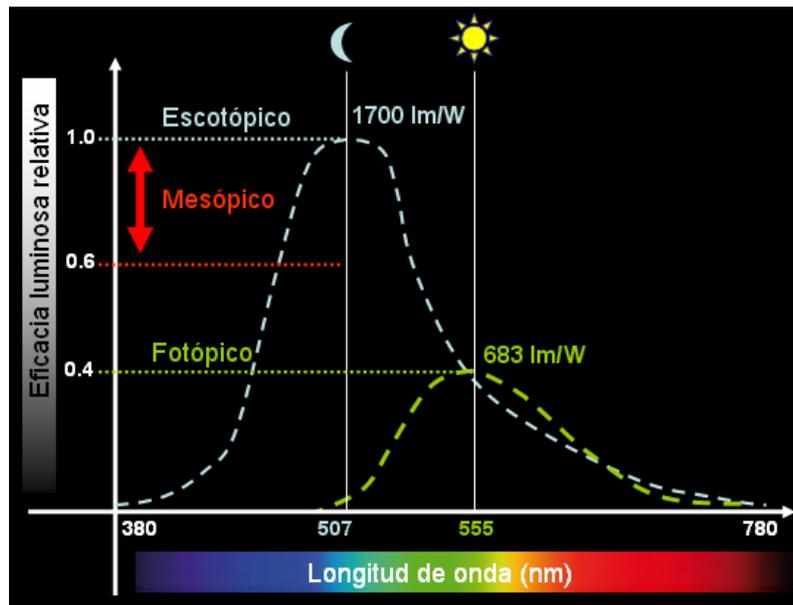


Fig A.1.3. Curvas límites correspondientes a la eficacia luminosa del ojo humano para cada uno de los tres niveles de visión. El espectro y el pico de eficiencia luminosa varían para cada uno de los niveles de visión. Los valores de luminancia utilizados en iluminación vial se sitúan en el nivel mesópico, dado que, generalmente, las luminarias están ajustadas en referencia a la curva fotópica. Los sistemas de alumbrado público se encuentran desajustados presentando una ineficiencia fotométrica importante. [Airisled 2012, Hyperphysics 2001]

El aspecto espectral de las medidas también presenta efectos sobre la medida de la distribución geométrica de la iluminación. Dado que la distribución geométrica se obtiene mediante un sistema óptico gran angular acoplado al sensor de una cámara digital situado en el plano focal del mismo, ha de conocerse tanto el comportamiento espectral asociado al sistema óptico como al sensor de la cámara.

Los sistemas ópticos gran angular presentan grandes aberraciones. En particular, la distorsión y la aberración cromática son muy importantes en este tipo de diseños. La aberración cromática hará variar los parámetros del sistema óptico que sean dependientes de la longitud de onda. La ecuación 4.2.12 presenta dos parámetros que dependen de la longitud

de onda, la distancia focal y la transmitancia. Los sistemas ópticos con gran campo de visión pueden presentar variaciones típicas de la distancia focal del orden de 0.1mm entre las zonas de longitud de onda corta (azules) y las más largas (rojas). [Zemax 2010]

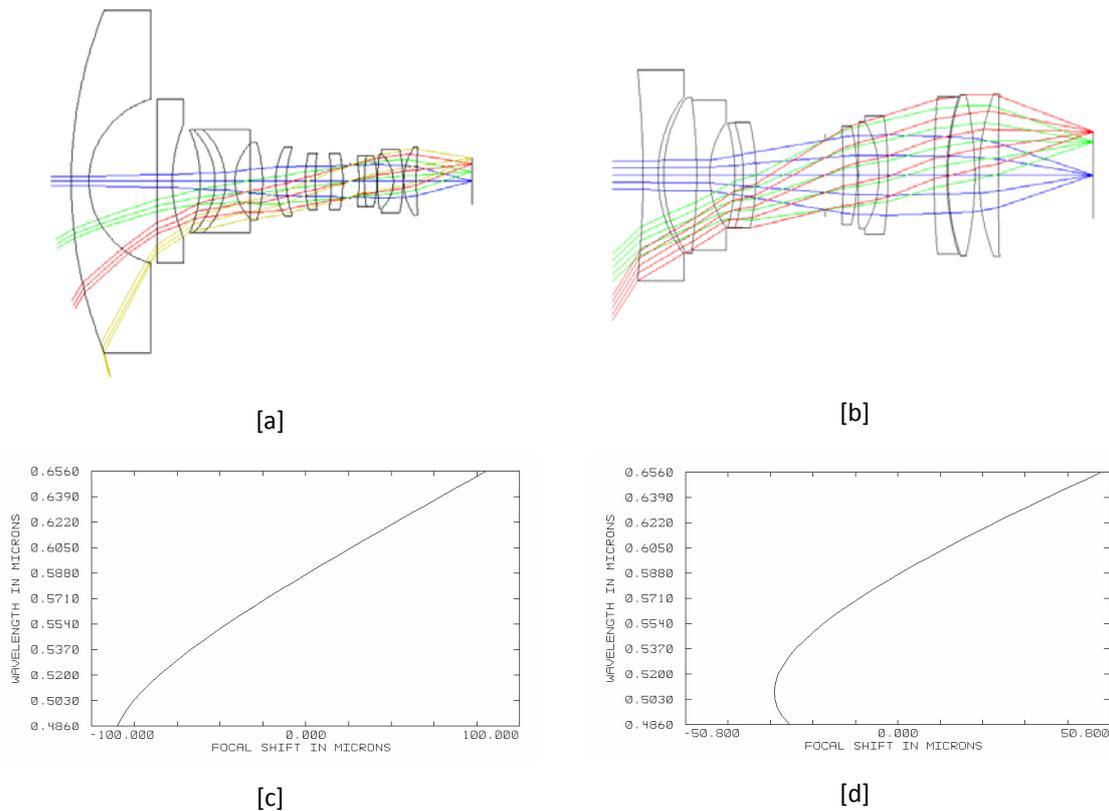


Fig A.1.4 Ejemplos de variación de la focal en función de la longitud de onda de dos sistemas ópticos gran angular. [a] Trazado gráfico para un gran angular de 210 Grados. [b] Trazado gráfico para un gran angular de 100 Grados. [c] Variación de la distancia focal para el diseño [a]. [d] Variación de la distancia focal para el diseño [b]. Se aprecia como para cada longitud de onda (eje de ordenadas) la focal del sistema varía de manera casi lineal [c], mientras que [d] presenta una forma completamente distinta, de tipo parabólico . [Zemax a 2010, Zemax c 2010]

Debido a la existencia de la aberración cromática, la ecuación 5.4.3 pasará ahora a tener una dependencia con la longitud de onda, por lo que esta ecuación será denominada la iluminación espectral sobre el plano focal del sistema óptico.

$$\phi(\varepsilon, \alpha, \lambda) = \Phi(\varepsilon, \lambda) \cos^3(\varepsilon) \phi_0(\varepsilon, \alpha, \lambda) \quad \text{Ecuación A.1.2}$$

Donde los nuevos subíndices hacen referencia al aspecto espectral que tiene en cuenta la ecuación, en particular, la transmitancia y la focal del sistema dependerán de la longitud de

onda debido a la dispersión espectral que en mayor o menor medida presentan todos los medios materiales.

Una vez que la luz ha atravesado el sistema óptico, se obtiene el registro de la distribución geométrica digitalizado por el sensor situado en el plano focal del sistema óptico. El sensor está compuesto por una serie de píxeles acoplados a un filtro cuya respuesta espectral está separada en tres canales tipo RGB. [Bayle 2007]

Normalmente el filtro fotométrico sigue el patrón Bayer, donde la estructura es RGGB en la celda base (ver figura A.1.5 a). Cada canal presenta un ancho de banda centrado en las tres regiones del espectro visible, longitudes de onda cortas (azules), zona central (verdes) y longitudes de onda largas (rojos). Además, cada canal tiene una eficiencia cuántica diferente entre sí (ver figura A.1.5 b), es decir, la capacidad de crear un número determinado de electrones por cada fotón que incide sobre el píxel. La combinación de los tres canales es suficiente para obtener la información colorimétrica del entorno de medida.

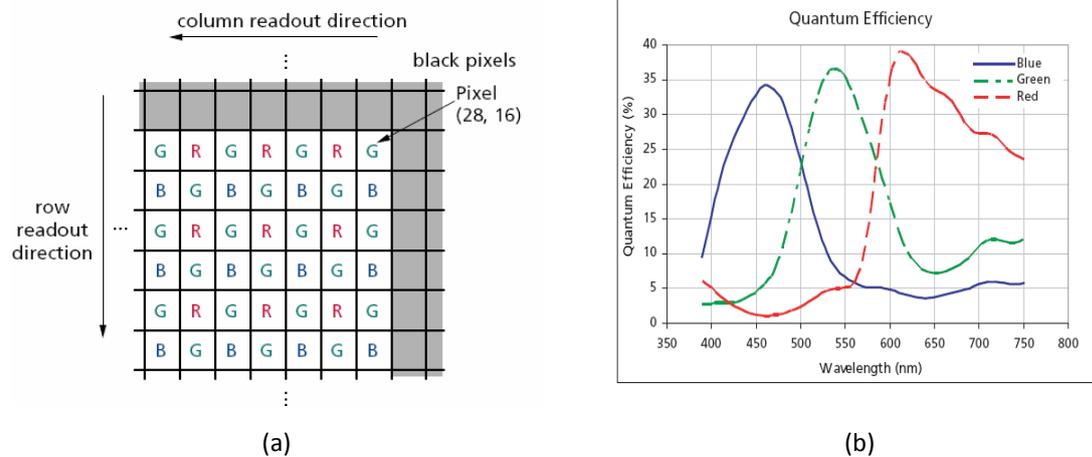


Fig A.1.5 La figura de la izquierda (a) muestra un esquema de la disposición de los canales RGGB según el patrón de Bayer sobre los píxeles de un sensor digital. La celda unidad con información fotométrica completa aumenta de 1 a 4 píxeles, ya que para obtener la información colorimétrica del entorno son necesarios al menos 3 canales de los cuatro que hay en cada celda unidad RGGB. La figura de la derecha (b) muestra a modo de ejemplo y en valores absolutos, para el sensor de Aptina MT9T031, la eficiencia cuántica asociada a cada uno de los canales RGGB. Se aprecia como en este caso, el pico de eficiencia cuántica aumenta según aumentan los valores del rango espectral en el cual trabajan cada uno de los canales. [Aptina 2012]

De los tres canales cromáticos del sensor y dependiendo del sensor, con el que se trabaje, el canal verde (G) es el que se encuentra más cercano a la curva que representa el

nivel de visión mesópico en la figura A.1.3, aunque presenta desviaciones respecto a la curva de visión mesópica y por tanto también debe ser corregido. La figura A.1.6 muestra las curvas de respuesta espectral para cada canal y la curva de visión mesópica del ojo humano que el sensor debe reproducir para obtener una correcta medida fotométrica.

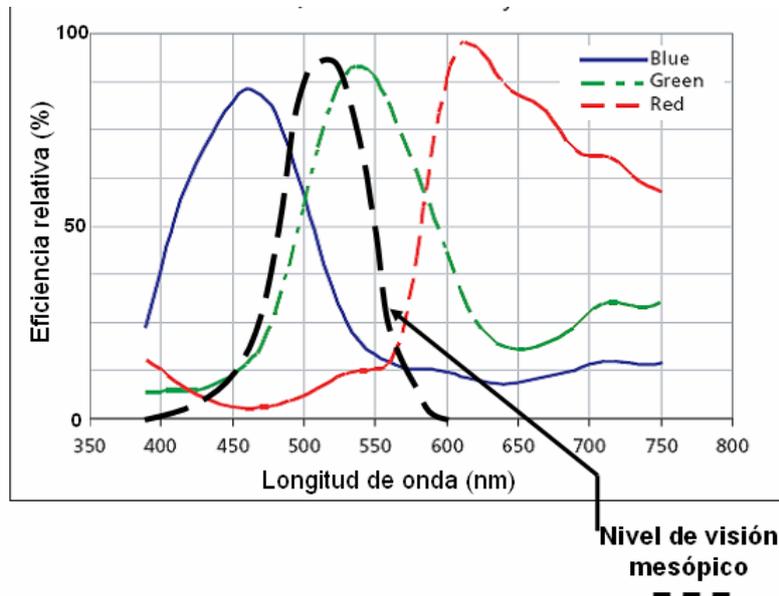


Fig A.1.6 Comparativa entre las curvas de eficiencia espectral relativa de los canales RGGB del sensor y la curva espectral del nivel de visión mesópico [Schreuder 2008]. El canal verde es el que se asemeja más a la respuesta visual humana. No obstante, la respuesta de cada canal debe ser corregida en base a la curva de nivel de visión mesópico, que es la que corresponde a las condiciones en las que se encuentra el ojo humano en entornos de medida de alumbrado público. [Aptina 2012]

Cada píxel actúa como un elemento integrador para todo el espectro electromagnético al que es sensible el píxel. Su nivel de gris (proporcional a la cantidad de luz recibida) equivale al área bajo la curva de respuesta espectral. Para obtener una respuesta espectral equivalente a la del ojo humano, el sensor trabajará conjuntamente con una serie de filtros como representa el patrón de Bayern, proporcionando la información colorimétrica necesaria a partir de la combinación de una celda unidad, que como se ha explicado antes consta de cuatro píxeles RGGB.

Teniendo en cuenta que el sensor responde con curvas espectrales distintas según el tipo de filtro interpuesto en cada píxel, es decir, filtro R, G o B. La ecuación A.1.2 debe ser modificada una vez más. En este caso, se ha de contemplar un factor $V_z(\lambda)$ que representa la curva de respuesta espectral del sistema visual humano pesada por el canal de cada uno de

los píxeles de la celda base del sensor (RGGB) (Fig A.1.7). El subíndice Z denota el canal por el que se encuentra pesada la curva de forma que:

$$\phi_Z(\varepsilon, \alpha, \lambda) = \begin{cases} V_R(\lambda)\Phi(\varepsilon)\phi(\varepsilon_0, \alpha_0) \\ V_G(\lambda)\Phi(\varepsilon)\phi(\varepsilon_0, \alpha_0) \\ V_B(\lambda)\Phi(\varepsilon)\phi(\varepsilon_0, \alpha_0) \end{cases} \quad \text{Ecuación A.1.3}$$

Las curvas espectrales efectivas que serán tenidas en cuenta respecto a la figura A.1.6 serán las que aparecen a continuación:

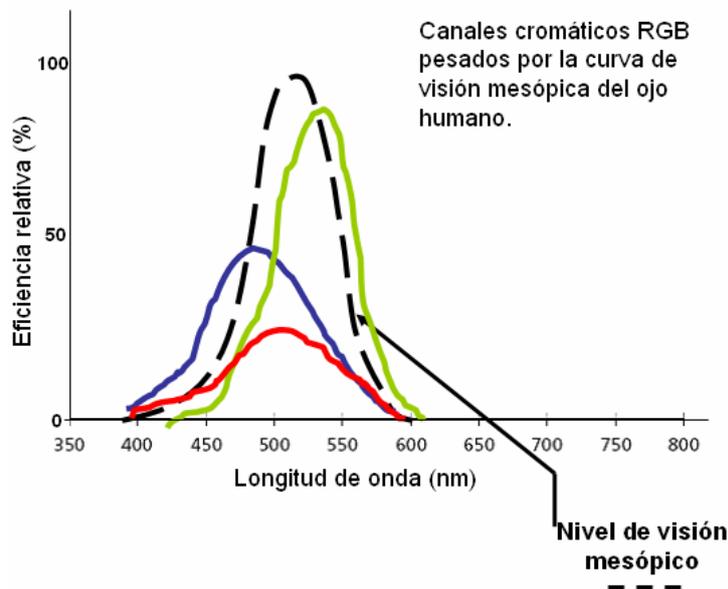


Fig. A.1.7 Representación de las curvas espectrales resultantes del producto entre la curva de nivel de visión mesópica y los tres canales que pertenecen al patrón de BAYER. En rojo se muestra la curva que resulta de multiplicar el canal R (rojo) por la curva de nivel de visión mesópica, en verde se muestra un análogo resultado teniendo en cuenta el canal G (verde), y finalmente en azul nuevamente el resultado respecto al canal B (azul).

El nivel de digitalización por cada uno de los píxeles RGGB de las celdas base es combinado para proporcionar la información colorimétrica del entorno de medida en cada canal. A partir de los valores RGGB registrados se pueden generar otros colores y calcular una señal proporcional a la percepción del ojo humano:

$$I = \frac{1}{3}(R + G' + B)$$

Ecuación A.1.4

Donde I es proporcional a la sensación que percibe el ojo humano, R y B son los valores obtenidos en cada uno de los píxeles referidos a los canales rojo y azul y G' es el valor promedio referente a los dos píxeles G que pertenecen a la celda base.

ANEXO B

B. Proceso dinámico de la realización de las medidas cooperativas.

Tal y como se ha comentando en el capítulo 4, la separación de los nodos de medida está fijada en función de la condición de continuidad de la iluminación en el plano de nodos. Sin embargo, la posición absoluta de dichos nodos no ha sido estudiada. Este es un parámetro de gran utilidad para situar correctamente los mapas de iluminación.

En este anexo se presentan las consideraciones teóricas y prácticas que deben ser tenidas en cuenta para determinar el posicionamiento óptimo de los nodos. Finalmente se incluye un ejemplo práctico de la estrategia aquí planteada.

Se describen a continuación los parámetros espaciales y temporales que influyen en el proceso dinámico de la medida.

Parámetros espaciales

Para controlar la posición global de los nodos de medida, el dispositivo deberá hacer uso de un sistema GPS incorporado que establece las coordenadas de todos y cada uno de los puntos de medida, de esta forma se determinan las condiciones de contorno globales de las medidas. La precisión de los sistemas GPS es del orden de varios metros, este orden de magnitud hace que se tornen insuficientes para situar adecuadamente los nodos de medida.

Por ello, y con el fin de mejorar el posicionamiento de los nodos, se ha analizado la posibilidad de optimizar el conocimiento de la posición inter-nodo. Dicho de otro modo, se trata de localizar la posición de un nodo a partir de la posición del nodo anterior, con esta

estrategia el error de posicionamiento del GPS queda restringido a un error global de todo el conjunto de medidas.

El método de posicionamiento local consiste en el procesado y análisis de los registros capturados por una cámara (cámara de posición local) que se enfoca sobre el plano de medida indirecta, generalmente asfalto. Con el fin de mejorar la calidad de las imágenes el sistema trabaja conjuntamente con un sistema de iluminación compacto.

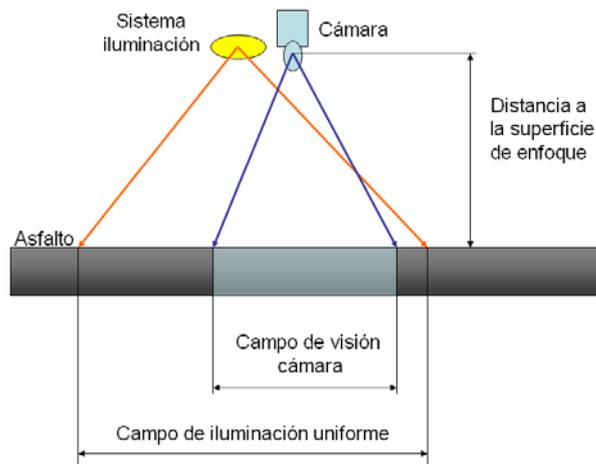


Fig. B.1.1 Esquema conceptual del sistema de detección de posición local de los nodos de medida. Empleando un sistema de iluminación adecuado, el campo de visión de la cámara queda uniformemente iluminado. De esta forma, el procesado de las imágenes es más exacto, lo que repercute en un mejor análisis de la determinación de la posición local del dispositivo.

El sistema de iluminación debe proporcionar el suficiente flujo luminoso en el área que corresponde al campo de visión de la cámara así como una correcta uniformidad en dicho campo. Los sistemas de iluminación basados en tecnología LED y óptica de plástico presentan suficientes prestaciones para nuestro propósito.

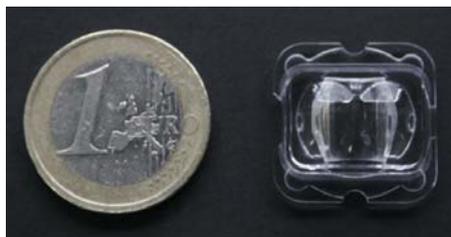


Fig. B.1.2 Lente de PMMA que combinada con un LED de distribución fotométrica lambertiana produce un campo de iluminación uniforme rectangular de $\pm 55^\circ$ y $\pm 25^\circ$. [Fernández-Dorado 2010, Arasa 2011b]

El posicionamiento de un nodo respecto al siguiente se obtiene a partir de la correlación bidimensional de las imágenes registradas de la superficie. Este registro se debe realizar de forma simultánea al registro fotométrico y distribución angular de cada uno de los nodos. Cada una de las capturas puede entenderse como una matriz rectangular $A^n_{i,j}$. Los subíndices i,j denotan la posición del píxel, mientras que el superíndice n muestra el número de la captura correspondiente a la matriz. Entre dos capturas consecutivas, existe una región que es común a ambas. Empleando el concepto de correlación bidimensional de matrices en la zona común de los registros es posible obtener el desplazamiento del dispositivo con mucha mayor precisión que las coordenadas GPS.

Con el fin de adaptarse a las diferentes estructuras de las superficies es necesario introducir una mejora en las imágenes captadas. De este modo, a cada una de estas imágenes (matrices) se le aplica un filtro de reconocimiento de estructuras basado en el cálculo del gradiente bidimensional de los valores de cada dato (píxel) de la matriz. Este proceso da como resultado un nuevo registro que contiene información acerca de las estructuras de la superficie enfocada que son más fáciles de reconocer. Finalmente, mediante el producto de correlación bidimensional entre dos capturas consecutivas a las que se ha aplicado el filtro de gradiente bidimensional, es mucho más sencillo, y estable, determinar el desplazamiento realizado entre una imagen y la siguiente.

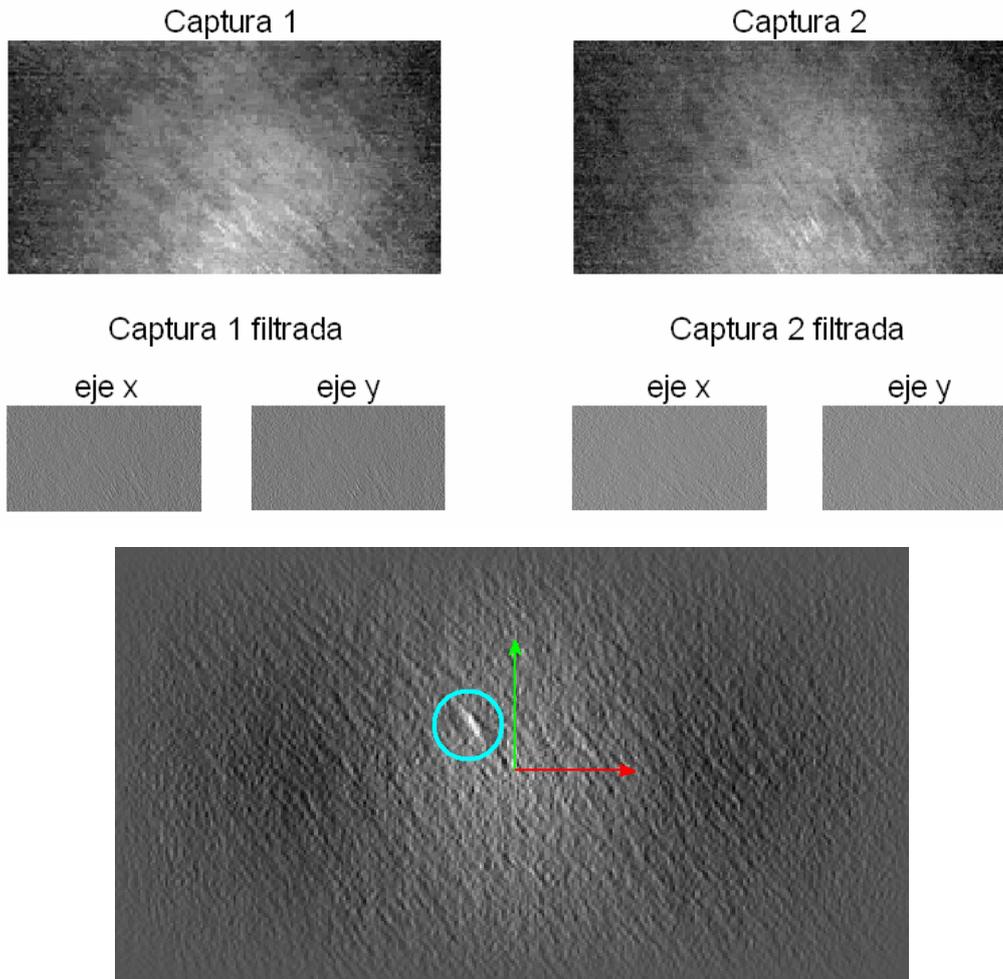


Fig. B.1.3 Capturas de la cámara de posición local y resultado del filtrado de cada una según el gradiente en la dirección de los ejes x e y (figura superior). Las estructuras resultantes como consecuencia de aplicar el filtro del gradiente hacen posible la determinación del desplazamiento existente del dispositivo entre los instantes que corresponden a las capturas 1 y 2. La figura inferior muestra la matriz de correlación. En ella se puede apreciar el valor máximo dentro del círculo azul. La posición del máximo denota un desplazamiento positivo en el eje vertical (y, verde) y un desplazamiento negativo en el eje horizontal (x, rojo)

Hallando el desplazamiento, en píxeles, entre registros y conociendo la distancia a la que se encuentra la cámara de la superficie, así como su campo de visión, se determina el desplazamiento efectuado por el dispositivo. En los siguientes párrafos se muestra un resumen de la estrategia ensayada en la presente tesis doctoral.

Sea dos matrices $A^n_{i,j}$ y $A^{n+1}_{i,j}$ que corresponden a dos capturas consecutivas y que comparten áreas comunes, es decir:

$$A^n_{i,j} \cap A^{n+1}_{i,j} = P \quad \text{Ecuación B.1.1}$$

Donde P es el conjunto de píxeles comunes a cada una de las dos capturas consecutivas. A cada matriz se le aplica el filtro del gradiente en cada una de las direcciones principales x e y:

$$\begin{aligned} A^n_{i,j} & \left/ \begin{cases} \nabla_x(A^n_{i,j}) = A^n_x \\ \nabla_y(A^n_{i,j}) = A^n_y \end{cases} \\ A^{n+1}_{i,j} & \left/ \begin{cases} \nabla_x(A^{n+1}_{i,j}) = A^{n+1}_x \\ \nabla_y(A^{n+1}_{i,j}) = A^{n+1}_y \end{cases} \end{aligned} \quad \text{Ecuación B.1.2}$$

A continuación se efectúa el producto de correlación bidimensional entre las matrices correspondientes a cada una de las direcciones principales:

$$\begin{aligned} A^n_x \otimes A^{n+1}_x &= C_x \\ A^n_y \otimes A^{n+1}_y &= C_y \end{aligned} \quad \text{Ecuación B.1.3}$$

Las matrices de correlación C_x y C_y son matrices de dimensiones $(2i, 2j)$. Las coordenadas del valor máximo alcanzando en las matrices de correlación proporcionan el desplazamiento existente entre las capturas consecutivas representadas por las matrices $A^n_{i,j}$ y $A^{n+1}_{i,j}$. Sea por tanto las coordenadas de los valores máximos de las matrices de correlación:

$$\begin{aligned} (i_x, j_x) &= \max(C_x) \\ (i_y, j_y) &= \max(C_y) \end{aligned} \quad \text{Ecuación B.1.4}$$

El desplazamiento en píxeles para cada dirección (x, y) entre dos capturas consecutivas será entonces:

$$\Delta(i, j) = \frac{(i, j) - (i_x, j_x) + (i, j) - (i_y, j_y)}{2} \quad \text{Ecuación B.1.5}$$

Donde el primer sumando del numerador del segundo término es el desplazamiento en las dos direcciones principales (x, y) según el gradiente en la dirección x. De la misma

forma, el segundo sumando representa el desplazamiento en las dos direcciones principales (x, y) según el gradiente en la dirección y , finalmente, ambos resultados son promediados y combinando los datos de desplazamiento de la ecuación 4.4.5 es posible obtener la trayectoria completa del dispositivo.

$$\Delta_x = i - \frac{i_x + i_y}{2}$$

$$\Delta_y = j - \frac{j_x + j_y}{2}$$

Ecuación B.1.6

Parámetros temporales

En el aspecto temporal, el parámetro fundamental es la frecuencia de trabajo del luxómetro y la cámara. La frecuencia de trabajo es la cantidad de veces que pueden realizar una medida o un registro, según sea el luxómetro o la cámara respectivamente en un segundo. Cuanto mayor es la frecuencia de trabajo, mayor será la velocidad a la que puede realizarse la medida.

La frecuencia de trabajo de estos elementos fija el menor período de tiempo con el que puede realizarse una medida entre dos nodos. Es decir, si f_m es la frecuencia máxima de trabajo del dispositivo y L la mínima separación entre dos nodos de medida, la velocidad máxima de la medida será:

$$v_{medida} = \frac{s}{t} = \frac{L}{1/f_m} = f_m \cdot L$$

Ecuación B.1.7

La velocidad de desplazamiento del dispositivo también afecta a la cámara de posición local. La frecuencia de trabajo de la cámara de posición local, el campo visual de la misma y la velocidad de desplazamiento se encuentran relacionados, ya que la cámara de posición local necesita de áreas comunes entre registros consecutivos para poder determinar la posición de un nodo respecto al anterior.

En la figura 4.4.6 se representa el sistema de posicionamiento en dos instantes de tiempo t_1 y t_2 . La cámara de posición local trabaja a una altura d con un ángulo de visión que permite obtener un área común de la superficie de enfoque (en nuestro ejemplo el asfalto) entre dos capturas consecutivas. El área común entre las dos capturas viene representada en la figura por el segmento w . Finalmente, el espacio recorrido durante el período de tiempo transcurrido entre los dos instantes temporales es denotado por e .

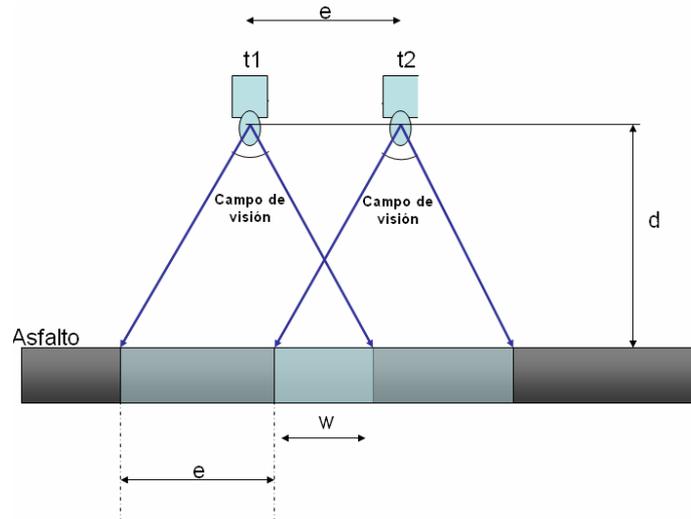


Fig. B.1.4 Esquema de avance de la cámara de posición local entre dos instantes de tiempo determinados. El avance e depende de la distancia de trabajo d de la cámara de posición local, del ángulo de visión y del área común necesaria para calcular correctamente la posición entre dos capturas consecutivas.

La distancia relativa entre nodos sólo se puede garantizar si:

$$e = Kw \quad / \quad 1 \leq K < \infty$$

Ecuación B.1.8

Donde K es una constante que varía entre 0 y 1 y expresa en tanto por uno la longitud de campo de visión común que comparten las capturas de la cámara en los dos instantes de tiempo t_1 y t_2 . Si $K \rightarrow 0$ entonces el área común en el campo de visión es nulo, mientras que si $K=1$ significa que el equipo no se habrá movido entre ambos instantes de tiempo.

En consecuencia, la velocidad de la cámara de posición local del equipo se expresará como:

$$v_{CPL} = \frac{s}{t} = f_{CPL} \cdot e \quad \text{Ecuación B.1.9}$$

Donde s representa una distancia, en general recorrida en un tiempo t , donde f es la frecuencia de trabajo de la cámara de posición local y, finalmente, e es el espacio recorrido por el equipo entre los instantes de tiempo t_1 y t_2 (fig B.1.4). Analizando la geometría de la figura B.1.4, se puede escribir que la distancia recorrida en general entre los dos instantes de tiempo representados será:

$$e = 4d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - w \quad \text{Ecuación B.1.10}$$

Donde el argumento de la función tangente representa la mitad del ángulo del campo de visión de la cámara de posición local. Si se sustituye B.1.8 en B.1.10 se obtiene:

$$e = \frac{K}{K+1} 4d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{Ecuación B.1.11}$$

Sustituyendo B.1.11 en B.1.9, se obtiene la velocidad máxima a la que puede operar el sistema de posición local.

$$v_{CPL} = \frac{s}{t} = f_{CPL} \cdot \frac{K}{K+1} 4d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{Ecuación B.1.12}$$

Ejemplo de aplicación

La prueba experimental consiste en detectar la trayectoria seguida por un dispositivo, en este caso la cámara de un teléfono móvil como dispositivo para la obtención de imágenes de suelo. El teléfono lleva incorporado un flash cuya fuente de luz es un LED blanco que ayuda a obtener una mejor imagen del pavimento. La captura de las imágenes se realizó sin ningún tipo de sistema de estabilización de la posición de la cámara con respecto al suelo. El vídeo que corresponde a la obtención de las imágenes de la trayectoria de la cámara puede consultarse en la dirección de internet:

<http://www.youtube.com/watch?v=c6Zc1kWriX4>

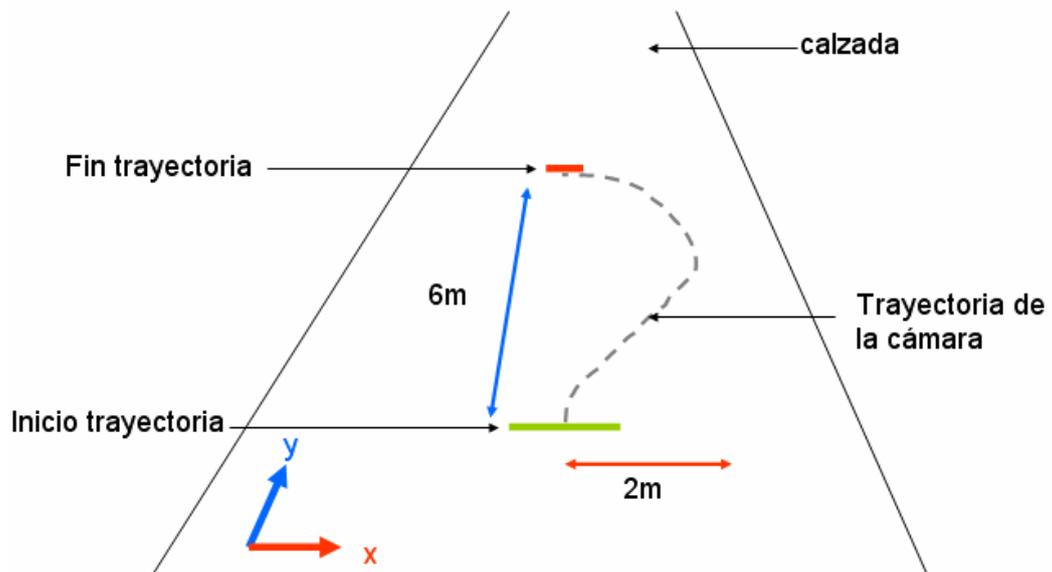


Fig B.1.5 Esquema que representa la geometría empleada para la realización del experimento de cálculo de la trayectoria de un dispositivo móvil.

Como muestra la figura B.1.3, cada imagen del vídeo es correlacionada con la siguiente de forma que es posible obtener, mediante el cálculo de correlación bidimensional, los desplazamientos en la dirección x e y del plano de la calzada. Este cálculo da como resultados las siguientes gráficas de desplazamiento:

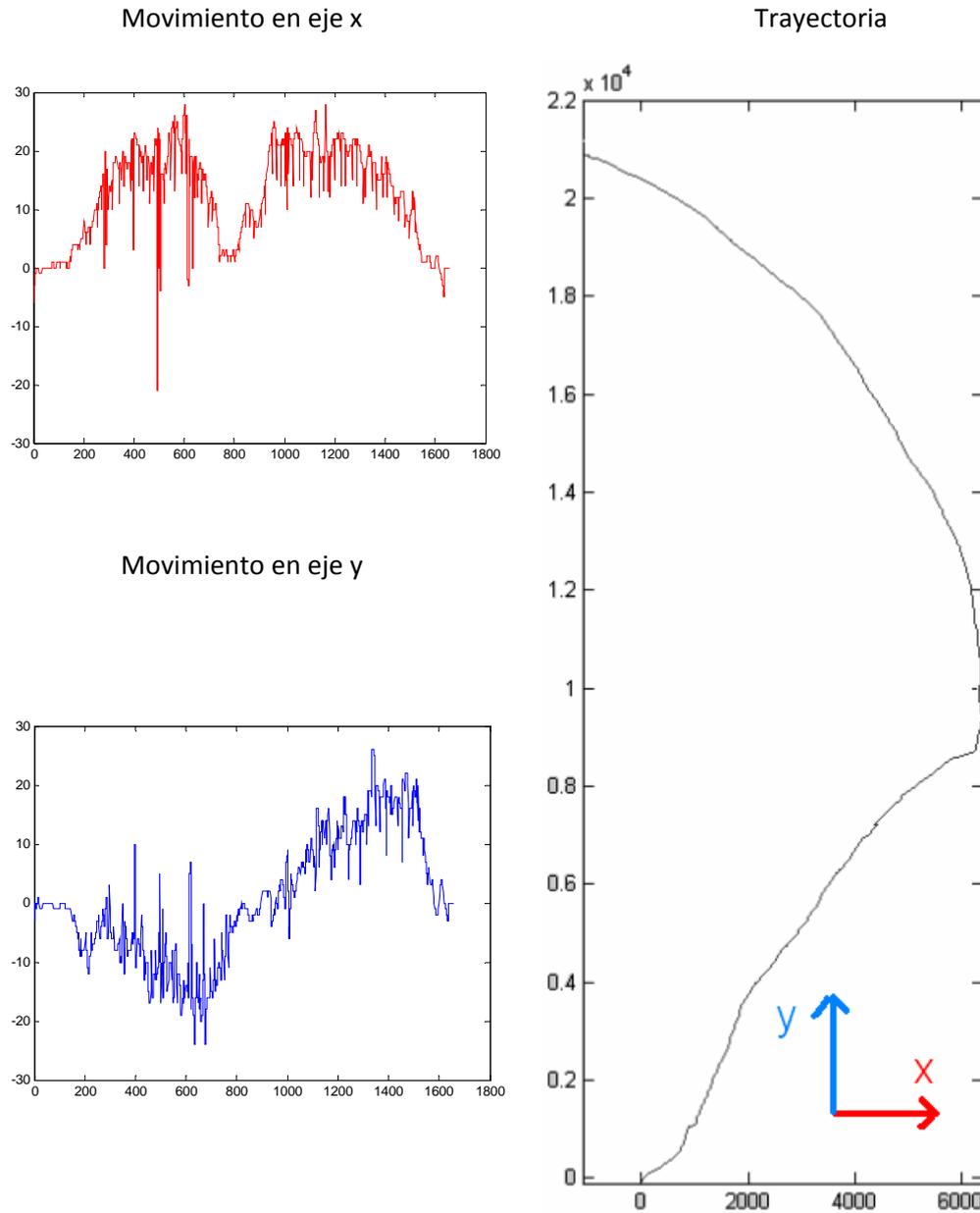


Fig B.1.6 Resultados del cálculo de la posición en los ejes x e y a través de la estrategia propuesta en este anexo. La gráfica en color rojo simboliza el desplazamiento en el eje x, mientras que la azul indica el desplazamiento en el eje y. Las unidades de los gráficos son en píxeles y deben ser traducidas unidades de distancia. Finalmente, en la parte derecha de la figura se muestra el resultado de componer ambos desplazamientos para obtener la curva de la trayectoria seguida por la cámara. El error cometido en la posición fue menor a 0.15m. Este error puede ser minimizado si se estabilizan la distancia y posición de la cámara con respecto al pavimento.

ANEXO C

C. Fotografías de las medidas en campo



C.1.1 Fotografía general del entorno de medida, donde pueden visualizarse claramente las cuatro farolas que enmarcan la cuadrícula del plano de referencia. También se distingue la distinta inclinación que presenta cada una de ellas.



C.1.2 Detalle de la cuadrícula que marca las posiciones de medida en el plano de referencia y sitúa las posiciones x,y para la realización de las medidas en los planos de nodos P02 y P10, y el plano de referencia P0.



C.1.3 Elementos mecánicos utilizados para desplazar el luxómetro, el ordenador portátil y la cámara en todas y cada una de las posiciones de la cuadrícula.



C.1.4 Fotografía correspondiente a un momento de realización de la medida en P10.



C.1.5 Las medidas fueron registradas en un sistema de grabación de voz, en este caso en un Minidisc. Posteriormente, toda la secuencia de medidas sería escuchada y transcrita a las matrices de datos con las que se trabajaría en el análisis de resultados.

D. FINANCIACIÓN, PUBLICACIONES Y DISEMINACIÓN DE LA TESIS.

La presente tesis doctoral ha sido financiada de forma parcial por el proyecto PÓLUX Dispositivo fotométrico móvil para iluminación vial, siendo la entidad financiadora el Ministerio de Ciencia e Innovación, programa INNPACTO IPT-2011-1675-020000, participando las entidades UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, FIBERCOM S.L. ILLIMIT COMUNICACIONS S.L, SIMULACIONS OPTIQUES S.L, ASOCIACION INDUSTRIAL DE OPTICA, COLOR E IMAGEN, AIDO y con un periodo de ejecución del 01-09-2011 al 31-11-2013

Las publicaciones directamente vinculadas a la realización de la presente tesis doctoral han sido

Patentes

[1] PCT-ES2010-070681_WO2011-061371_26-05-2011,

TITULO Dispositivo fotométrico electro-óptico dinámico y su procedimiento para la medición dinámica de la cantidad y distribución de luz policromática, INVENTORES J, Arasa, C. Pizarro, J. Caum. M Arjona, N, Tomás, P. Blanco, E. Oteo, J. Fernández, F. Alarcón, F. Sanabria, ENTIDAD TITULAR Simulacions Òptiques S.L.

ESTADO: En explotación

Participación en congresos

Autores: Josep Arasa, José Fernández-Dorado, Carles Pizarro, Montserrat Arjona, Esther Oteo, and José Díaz Navas.
Título: Photometric device with full angular normalized information valuable to determine the glare effect in buildings: Experimental validation.
Tipo de participación: Póster
Congreso: AIC Midterm Meeting of the International Colour Association
Publicación: Actas del congreso
Lugar: Zurich (Switzerland)
Fecha: Junio 2011

Autores: J. Fernández-Dorado, E. Oteo , J. Arasa, P. Blanco, C. Pizarro
Título: Nuevo dispositivo fotométrico con capacidad de discretización angular en la medida.

Tipo de participación: Póster
Congreso: 7ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'11
Publicación: Actas del congreso
Lugar: Universidad de Cantabria, Santander
Fecha: Junio 2010

Autores: J. Arasa, Esther Oteo, J. Fernández-Dorado, P. Blanco, C. Pizarro, J. A. Díaz
Titulo: New iterative flux based in the design strategy for freeform surfaces generation for LED lighting technology.

Tipo de participación: Ponencia
Congreso: SPIE Europe Optical Systems Design
Publicación: Proceedings del propio congreso
Lugar: Marsella (France)
Fecha: Septiembre 2011

Otras publicaciones y patentes publicadas durante la realización de la presente tesis doctoral

Patentes

[1] Patente

ES200701044

TITULO Método óptico y aparato para la detección de copias piratas de CDs, (Optical method to distinguish between original and fake CDs)

INVENTORES J. Fernández-Dorado, J. Hernández-Andrés, E. M. Valero, J. L. Nieves, J. Romero

ENTIDAD TITULAR Universidad de Granada

[2] Patente

P201030274_25-03-2010

TITULO Lente de plástico para alumbrado uniforme con LED

INVENTORES J. Arasa, C. Pizarro M Arjona, N. Tomás, P. Blanco, E. Oteo, J. Fernández

ENTIDAD TITULAR Simulacions Òptiques S.L.

Artículos

[1] José A. Díaz, José Fernández-Dorado, Francisco Sorroche. "Role of the human lens gradient-index profile in the compensation of third-order ocular aberrations". Journal of Biomedical Optics 17(7), 075003, (2012)

[2] José A. Díaz, Nicolás Blazejewski, José Fernández-Dorado, Josep Arasa, Francisco Sorroche. "Robustness of the crystalline lens GRIN profile in a schematic eye model". Journal of Modern Optics, 2011

[3] José A. Díaz, José Fernández-Dorado, Carles Pizarro, Josep Arasa.
Zernike coefficients for concentric, circular scaled pupils: an equivalent expression.
Journal of Modern Optics, Volume 56, Number 1, January 2009 , pp. 131-137(7)

[4] José Fernández-Dorado, Javier Hernández-Andrés, Eva M. Valero, Juan L. Nieves, Javier Romero. "A simple experiment to distinguish between replicated and duplicated compact discs using Fraunhofer diffraction". Am. J. Phys. 76 , 1137-1141 (2008).

Comunicaciones a Congresos

Autores: E. Oteo, J. Fernández-Dorado, J. Arasa, P. Blanco, C. Pizarro
 Título: Novel method for misalignments measurement on imaging systems through quality image analysis
 Tipo de participación: Póster
 Congreso: SPIE Optical Metrology (Optical Measurement Systems for Industrial Inspection)
 Publicación: Proceedings of SPIE in Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII, Vol. 8082
 ISBN/ISSN 9780819487964 Pág 817004-(1-11)
 Editor Peter H. Lehmann, Wolfgang Osten, Kay Gastinger,
 Lugar: Munich (Alemania)
 Fecha: 22-26 May 2011

Autores J.A. Díaz , N. Blazejewski, J. Fernández-Dorado, J. Arasa, F. Sorroche, C. Pizarro
 Título: Analysis of the robustness of the lens GRIN profile in a schematic model eye
 Ref. Journal of Modern Optics. ISSN: 09500340
 Clave A Volumen: 58 Páginas 1764-1769 Fecha: 2011
 Lugar de publicación USA

Autores: José Fernández-Dorado, Esther. Oteo, J. Arasa, P. Blanco, Carles Pizarro, Nuria Tomás.
 Título: Scientific and technical basis in optical design for embeded LEDs in energy saving streetlights.
 Tipo de participación: Póster
 Congreso: European Energy Conference
 Publicación: Proceedings del propio congreso
 Lugar: Barcelona (Spain)
 Fecha: 2010

Autores: J. Arasa, J. Fernández-Dorado, E. Oteo, P. Blanco, C. Pizarro, N. Tomás, J. Antó
 Título: New approach in optical design strategy for illumination systems with embedded led sources
 Tipo de participación: Ponencia
 Congreso: RIAO-OPTILAS.2010 (VII conferencia Iberoamericana de óptica)
 Publicación: Proceedings del propio congreso
 Lugar: Lima (Perú)
 Fecha: Septiembre 2010

ANEXO D

Autores: Francisco Sorroche, José A. Díaz, José Fernández-Dorado and Josep Arasa.
Titulo: ABCD Matrix for Calculating Third-Order Aberrations of Gradient Index Optical Elements
Tipo de participación: Póster
Congreso: Proccedings IODC
Publicación Proccedings
Lugar: San Diego (USA)
Fecha: 2010

Autores: F.Sorroche, J.A. Díaz, J. Fernández-Dorado y J. Arasa
Titulo: ABCD matrix for calculating third-order aberrations of gradient index optical elements.
Tipo de participación: Ponencia
Congreso: International Optical Design Conference.
Publicación Proceedings of SPIE vol. 7652.
Lugar: Jackson Hole (EEUU)
Fecha: Agosto 2010
Autores: J. Arasa, E. Oteo, J. Fernández-Dorado, P. Blanco, C. Pizarro, J. A. Díaz
Titulo: New iterative flux based in the design strategy for freeform surfaces generation for LED lighting technology.

Autores: J. Fernández-Dorado, J.A. Díaz y J. Arasa
Titulo: Evaluación de la sensibilidad en la determinación del índice de refracción mediante técnicas CAM y BAM
Tipo de participación: Oral
Congreso: IX Reunión Nacional de Óptica.
Publicación Actas del congreso
Lugar: Ourense (España)
Fecha: Septiembre 2009

Autores: José Fernández-Dorado, Javier Hernández-Andrés, Eva M. Valero, Juan L. Nieves, Javier Romero
Titulo: Análisis de difracción de la luz en superficie pseudo periódicas.
Tipo de participación: Póster
Congreso: IX Reunión Nacional de Óptica.
Publicación Actas del congreso
Lugar: Ourense (España)
Fecha: Septiembre 2009

Autores: J. Fernández-Dorado, J.A. Díaz y J. Arasa
Titulo: El GRIN del cristalino como elemento compensador a las aberraciones oculares en tercer orden
Tipo de participación: Póster
Congreso: IX Reunión Nacional de Óptica.
Publicación Actas del congreso
Lugar: Ourense (España)
Fecha: Septiembre 2009

ANEXO D

Autores: J.A. Díaz, J. Fernández-Dorado, J. Arasa y C Pizarro
Título: Estudio paraxial con la edad de un modelo de ojo emétrepe desacomodado con cristalino GRIN
Tipo de participación: Póster
Congreso: IX Reunión Nacional de Óptica.
Publicación: Actas del congreso
Lugar: Ourense (España)
Fecha: Septiembre 2009

Autores: J.A. Díaz, J. Fernández-Dorado, C. Pizarro y J. Arasa
Título: Zernike coefficients for concentric, circular scaled pupils: an equivalent expression.
Ref. Journal of Modern Optics. ISSN: 09500340
Clave A Volumen: 56 Páginas 131-137 Fecha: 2009
Lugar de publicación USA

Diseminación de resultados.

Durante la realización de esta tesis también se han llevado a cabo acciones de diseminación de resultados, las más destacables han sido:

2011

Presentación en el World Smart City Awards del congreso Smart city Expo, Barcelona Abril 2011, PROYECTO POLUX: DISPOSITIVO FOTOMÉTRICO MÓVIL PARA ILUMINACIÓN VIAL

2012

La Vanguardia, Martes 13 de Noviembre de 2012, pagina 3, "Inspiració Barcelona" Autor Raúl Montilla. Reportaje de Smart Cities

Diari de Terrassa , 16 de Noviembre de 2012, página 8, "Nueva Tecnología de la UPC para medir el alumbrado urbano", Autor: redacción

Suplemento Semanal "La Torre", 17 de Noviembre de 2012, pagina 12 " 400 mil euros anuals es malgasten en enllumenat", Autor Lluïsa Terrida

Impactos en Internet (enlaces)

http://www.upc.edu/aprender/pepe-fernandez-dorado?set_language=es

<http://www.autocasion.com/actualidad/noticias/118226/lanzan-un-dispositivo-que-mide-la-luz-de-la-carretera-para-reducir-accidentes-y-contaminacion/>

<http://www.que.es/barcelona/201211121848-landan-dispositivo-mide-carretera-para-epi.html>

<http://www.presspeople.com/pr/upc-desarrollan-nueva-tecnologia-medir-alumbrado>

<http://www.europapress.cat/economia/noticia-fira-llancen-mercat-dispositiu-mesura-llum-carretera-per-reduir-els-accidents-contaminacio-20121112191235.html>

<http://www.ilimit.com/cloud-computing/ilimit-participa-en-el-proyecto-de-investigacion-polux/>

http://www.infoambiental.es/actualidad/detalle_actualidad/-/asset_publisher/Utf7/content/desarrollan-una-nueva-tecnologia-para-evaluar-el-alumbrado-urbano-y-reducir-su-consumo

<http://www.cd6.upc.edu/innovation-project.php?project=522&innovat>

<http://instalaciones.editorial-albatros.com/?p=6972>

<http://es.scribd.com/doc/82572241/Focus-37>

<http://www.aido.es/webportal/desktopmodules/base/viewitem/tools/>

<http://www.elcorreo.com/innova/empresas/20121114/polux-20121114>

Bibliografía

- [Aemc 2012] <<http://www.aemc.com>> Luxómetros Modelos CA811 y CA813. Datasheet AEMC company. 200 Foxborough Blvd. Foxborough, MA 02035
- [Airisled 2012] <<http://www.airisled.es>> Airis España. 2012.
- [Alcon 2012] <<http://www.alconlighting.com>> Indoor lighting products Alcon lighting, INC. 2845 S. Robertson Blvd., Los Angeles, CA 90034, USA. 2012
- [Anfalum 2005] FUNDACIÓN ECOLUM *Jornada informativa. Aplicación de la directiva 2002/96/CE RAEE'S*. Madrid, 24 de Octubre de 2005.
- [Apple 2012] <<http://www.applesfera.com>> Geo posicionamiento de imágenes en el firmware 20 del iPhone. Apple INC. California, 2012.
- [Aptina 2012] <<http://www.aptina.com>> MT9M001 - 1/2-Inch Megapixel Digital Image Sensor datasheet. Aptina Imaging Corporation. Bracknell RG12 2XT United Kingdom. 2012.
- [Arasa 2011] Josep Arasa, José Fernández-Dorado, Carles Pizarro, Montserrat Arjona, Esther Oteo y José Antonio Díaz Navas. *Photometric device with full angular normalized information valuable to determine the glare effect in buildings: Experimental validation*. AIC Midterm Meeting of the International Colour Association. Actas del propio congreso. Zurich, 2011.
- [Arasa 2011b] J. Arasa, Esther Oteo, J. Fernández-Dorado, P. Blanco, C. Pizarro, J. A. Díaz. *New iterative flux based in the design strategy for freeform surfaces generation for LED lighting technology*. SPIE Europe Optical Systems Design. Proceedings del propio congreso. Marsella (France). 2011

- [Arranz 2005]** Arranz, María Jesus. *Far-field characterization of automotive headlamps from near-field measurements*. [Tesis Doctoral]. Terrassa. Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- [Bass 1995]** Bass M, Van Stryland E, Williams R, Wolfe W. "*Handbook of Optics*". Volume II (Devices, Measurements & Properties) Chapter 24. I.S.B.N: 0-07-047974-7. 1995. McGraw-Hill, Inc.
- [B2b-linx 2012]** <<http://www.b2b-linx.com>> Producto comercial referente a las luminarias de LED. München 2012.
- [Bayle 2007]** Arnau Bayle. Enric de Santos. *Fotografía digital en blanco y negro*. ISBN: 978-84-88610-84-3, Barcelona, 2007.
- [Cambridge 2012]** Cambridge in Colour is an online learning environment where photographers can come to improve their skills. <<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>>
- [Casas 1994]** Justiniano Casas. *Óptica* I.S.B.N:84-605-0062-4, Zaragoza. 1994
- [Casol 2008]** Casol, M; Fiorentin, P and Scroccaro, A. *On road measurements of the luminance coefficient of paving*. 16th IMEKO TC4 Symposium. Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements. Florence, Italy, 2008.
- [Deschères 2012]** Luis Deschères, Heriberto Rey. *Nota Técnica. Visión mesópica y eficiencia energética en el alumbrado público*. Facultad de ciencias exactas de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina. 2012.
- [DxoMark 2012]** <<http://www.dxomark.com>> DxOMark is the trusted industry standard for camera and lens.
- [Edmund 2012]** <<http://www.edmundoptics.com>> Cámaras de visión de Maquina EO de USB 2.0 Unit 1, Opus Avenue, Nether Poppleton, York, YO26 6BL, UK. 2012.
- [Edmund 2012b]** <<http://www.edmundoptics.com>> Rocket Laser Pointer. REF NT54-006. Unit 1, Opus Avenue, Nether Poppleton, York, YO26 6BL, UK. 2012.
- [Fallah 1996]** Hamid R Fallah and Jonathan Maxwell. *HIGHER Order Pupil Aberrations in Wide Angle and Panoramic Optical Systems*. SPIE proceedings. 1996.

- [Fernández-Dorado 2010]** José Fernández-Dorado, Esther. Oteo, J. Arasa, P. Blanco, Carles Pizarro, Nuria Tomás. *Scientific and technical basis in optical design for embedded leds in energy saving streetlights* Proceedings European Energy Conference. Barcelona 2010.
- [Fernández-Dorado b 2011]** José Fernández-Dorado, Esther Oteo, J. Arasa, P. Blanco, Carles Pizarro *New photometric device with angular discretization capability* 7ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL, Santander, 2011.
- [Foote 1915]** Paul D. Foote. *Illumination from a radiating disk* The Bulletin of the Bureau of Standards 12, 583 (1915).
- [Forware 2012]** <<http://www.forware.es>> Diseño basado en FPGAS Forware Spain S.L. Granada. 2012.
- [Fuentes 1999]** L.M. Fuentes, *Construcción de un fotómetro de imagen digital. Calibración detallada y aplicaciones*, Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid, España (1999).
- [Fujiyama 2005]** Fujiyama, T; Childs, C; Boampong, D and Tyler, N. *Investigation of Lighting Levels for Pedestrians. –Some questions about lighting levels of current lighting standards-* London, 2005.
- [Gibbons 2007]** Gibbons. R. *The influence of pavement reflection on the visibility of objects*. Proceedings of CIE, USA, 2007.
- [Goodman 2005]** Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics. Third Edition*. ISBN 0-9747077-2-4. 2005.
- [Google 2012]** <<http://www.google.es>> Google maps and street view application Google INC, California, 2012.
- [Gossen 2012 a]** www.gossen-photo.de *Luxómetro LX032, datasheet*. Nürnberg, 2012.
- [Gossen 2012 b]** <<http://www.gossen-photo.de>> *Luxómetro LX01, datasheet* Nürnberg, 2012.
- [Güler 2002]** Güler, Ö and Onaygil, S; *Evaluation of visibility level formula in road lighting with field measurements*. Istanbul Technical University. Turkey. 2002.
- [Hamamatsu 2012]** <<http://www.hamamatsu.com>> Si photodiode S9219 series. Datasheet. Cat. No KSPD1063E04. Hamamatsu City. Marzo 2005.

- [Healey 1994]** Healey G. E. And Kondepudy R. "Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation". IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Int., 1994, **16**, 267-276.
- [Hubel 1994]** P.M. Hubel, D. Sherman, J.E Farrell, *A comparison of methods of sensor spectral sensitivity estimation*, Proceedings of IS&T and SID's 2^o Colour Imaging Conference: Colour Science, Systems and Applications, Vol 48, No 1 pp 45-48 (1994).
- [Hyperphysics 2001]** Carl R. (Rod). *Luz y Visión*. Department of Physics and Astronomy. Georgia State University. Atlanta, Georgia 30302-4106, 2001. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/vision/bright.html>>
- [IDS 2010]** <<http://www.ids-imaging.com>> Camera datasheet model USB 2 UI-1540LE-M. IDS company. Dimbacher Str. 6-8 D-74182 Obersulm 2010.
- [IL 2012]** intl-lightech.com *Lux meter. International Light 1700. Datasheet*. Massachusetts, 2012.
- [ITC 2008]** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *Instrucciones técnicas complementarias*. Madrid, 19 de Noviembre 2008.
- [ITC-EA-01 2008]** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *Instrucciones técnicas complementarias. Parte 1. Eficiencia Energética*. Madrid, 19 de Noviembre 2008.
- [ITC-EA-07 2008]** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *Instrucciones técnicas complementarias. Parte 7. Mediciones luminotécnicas en las instalaciones de alumbrado* Madrid, 19 de Noviembre 2008.
- [Jackett 2009]** Jackett, J, M y Frith, JW. *Measurement of the reflection properties of road surfaces to improve the safety and sustainability of road lighting*. New Zealand Transport Agency research report 383. Wellington 2009.
- [Kineo 2009]** <<http://www.kineoptics.com>> Camera info document about lens threads and registers. Kine optics company. Optical and Mechanical instruments. USA, 2009.
- [Kingslake 2010]** Kingslake, Rudolf. Barry Johnson, R. *Lens Design Fundamentals* Spie Press. ISBN 978-0-12-374301-5. 2010.
- [Laikin 1995]** Milton Laikin *Lens Design, Third Edition, (Optical Science and Engineering)* Publisher: CRC Press; 3 edition | 2001 | 494 Pages | ISBN: 0824705076.

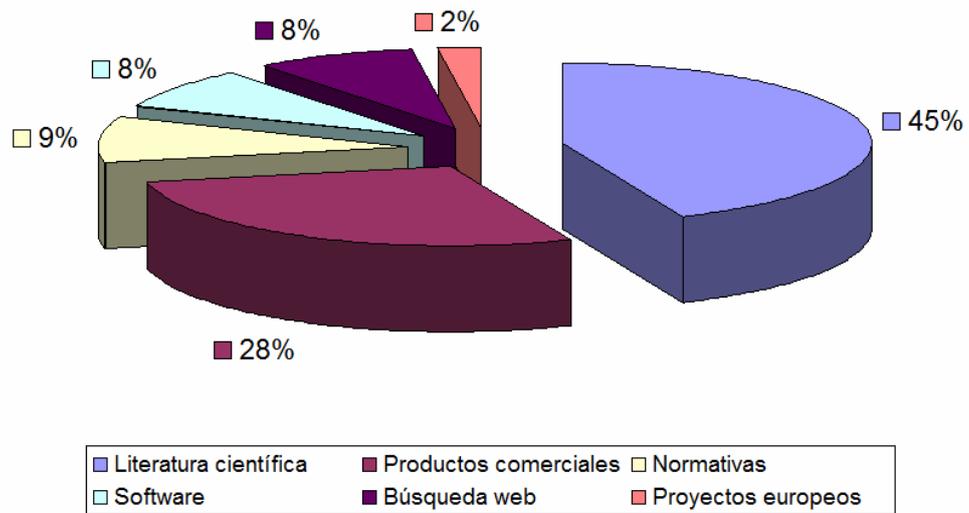
- [**Laikin 2001a**] Milton Laikin *Lens Design, Second Edition, page 107. Marcel Dekker, 1995.*
- [**Laikin 2001b**] Milton Laikin *Lens Design, Second Edition, chapter 9. Marcel Dekker, 1995.*
- [**Lasarte 2009**] Marta de Lasarte Rigueiro *Thorough Characterization and Analysis of a Multispectral Imaging System* PhD Dissertation, Terrassa 2009.
- [**Lenstation 2012**] <<http://www.lensation.de>> Lensagon BFM2320 wide angle optical objective. Datasheet. Unterer Dammweg 12, 76149 Karlsruhe, Germany. 2012.
- [**Light pole 2012**] <<http://www.lightpole.com>> Producto comercial referente a las carcassas de luminarias de la serie multipoles. Mona Vale, Australia. 2012.
- [**Mahajan 1998**] Virendra N. Mahajan *Optical Imaging and Aberrations: Part I. Ray Geometrical Optics* ISBN: 9780819425157. 1998.
- [**Marín 2009**] Luis Diego Marín Naranjo. *Análisis de la ley de cuadrado inverso para medición práctica de iluminancia.* Ingeniería 19 (1): 87-96, ISSN_ 1409-2441; 2009. San José, Costa Rica.
- [**MATLAB 2011**] <<http://www.mathworks.com>> Matlab version 7.12. UPC Licensed. 2011.
- [**Matlab 2012**] <<http://www.mathworks.es/es/help/documentation-center.htm>>
- [**McMenemy 2003**] Karen McMenemy ; Francis Mullin and Gordon Dodds "Calibration and use of video cameras in the photometric assessment of aerodrome ground lighting", Proc. SPIE 5017, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications IV, 104 (May 14, 2003); doi:10.1117/12.476780.
- [**Micropap 2012**] <<http://www.micropap.com>> Driver SD-808 manual datasheet C/ Ferrer i Guardia 4, 08224 Terrassa. España.
- [**Morante 2008**] Morante, P *Mesopic Street Lighting. Demonstration and Evaluation. Final Report* Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, New York, 2008.
- [**Multilamp 2009**] Producto comercial referente a reflectores con tecnología LED. Sant Boi de Llobregat | Barcelona | España 2009.

- [Nieves 2002]** Juan Luis Nieves Gómez, José Ramón Jiménez Cuesta, Javier Hernández Andrés. *Introducción a la teoría difraccional de la formación de imágenes*. ISBN 84-607-7970-3. 2002.
- [Palma 2007]** *Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno*. La Palma, Islas Canarias. 2007.
- [Nicolau 2005]** Proyecto Europeo Development of compact tools for the photometric testing of light sources used in terrestrial transportation. EU-CRAFT contract G3ST-CT-2002-50345 Universidad Politécnica de Cataluña. 2005.
- [Palmer 2009]** Palmer, James M. *The art of the radiometry*. SPIE Press Monograph Vol. PM184. 2009.
- [Philips 2009]** Koninklijke Philips Electronics N.V. *Legislación medioambiental de la U3 27 en materia de iluminación* Ref.: RU 3222 635 59401. España, Septiembre 2009.
- [Philips 2012]** <http://www.philips.com> Luxeon Rebel LED datasheet. Part number LXML.PWN2 Royal Philips Electronics. Amstelplein 2. Breitner Center. P.O. Box 77900. 1070 MX. Amsterdam. The Netherlands. 2012
- [Pigmentomedia 2011]** *Fotómetro de luz reflejada* Pigmentomedia 2011.
- [POL 2009]** J. Fernández-Dorado, J, Arasa, C. Pizarro, J. Caum, M Arjona, N, Tomás, P. Blanco, Esther Oteo, F. Alarcón, F. Sanabria. *Dispositivo fotométrico electro-óptico dinámico y su procedimiento para la medición dinámica de la cantidad y distribución de luz policromática. (Dynamic electro-optical photometric device and its procedure for the dynamic light measurement and polychromatic distribution)*. P200931006, spanish patent, 26-October-2009.
- [POLUX 2011]** **Proyecto POLUX** Dispositivo fotométrico móvil para iluminación vial. Apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad Expediente IPT-2011-1675-020000.
- [Real Decreto 1890]** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio *Real Decreto 1890/2008. Eficiencia Energética* Madrid, 14 de Noviembre. 2008
- [Robyn 2012]** <http://www.rmimaging.com> Colorchecker chart Robin D. Myers. 2012.
- [Roper 2004]** Roper Scientific GMBH. http://www.photomet.com/libray_enc_linearity.shtml

- [RTVE 2011]** <<http://www.rtve.es>>
- [RS 2010]** rs-online.com *Luxómetro con salida digital RS-232. Referencia 180-7133.*
- [Sánchez de Miguel 2010]** Sánchez de Miguel, A; Zamorano, J; Pila-Díez, B; Rubio Jiménez, J, Ruiz Carmona, R; Rodríguez Herranz, I y González Pérez, A. *Contaminación Lumínica en España 2010.* Departamento de Astrofísica y CC de la atmósfera UCM, ASAAF-UCM.
- [Schreuder 2008]** Duco Schreuder *Outdoor Lighting. Physics, Vision and Perception. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing* 1402086016, 9781402086014, Springer, 2008.
- [Sierra 2002]** C. Sierra, *Aplicaciones luminotécnicas de cámaras digitales, Tesis doctoral,* Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (2002).
- [Smith 2007]** Smith, Warren J. *Modern optical engineering: the design of optical systems* McGraw-Hill. ISBN 0-07-136360-2. 2007.
- [Sylvania 2012]** Producto referente a las luminarias outdoor de la serie Sylvania de Osram Company. Danvers, MA 01923 USA, 2012.
- [Takeuchi 1993]** Hideo Takeuchi, Shinji Hashimoto, and Issei Harada. *Simple and Efficient Method to Eliminate Spike Noise from Spectra Recorded on Charge-Coupled Device Detectors.* Applied Spectroscopy, Vol. 47, Issue 1, pp. 129-131 (1993).
- [Toptical 2012]** <<http://www.toptical.com>> Hig resolution luminance measuring cameras. LMK 11/16MP model. Taiwan 2012.
- [Toscani 2012]** <<http://www.pierretoscani.com>>
- [Twilight 2012]** <<http://www.twilight.mx>> Luxómetros Modelos LT-YK10LX, LT-LX1108 y LT-YK35UV Twilight S.A. Monterrey, Nuevo León, México. 2012.
- [UDC 2012]** Pablo Adelto Hernández Ortega *Alumbrado urbano Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2012.*
- [Üncü 2010]** Serkan Üncü, I; Kayakus, M. *Analysis of visibility level in road lighting using image processing techniques* Academic Journals. Isparta, Turkey. 2010.

- [UNE-EN 13032-1]** Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. *Luz y alumbrado. Medición y presentación de datos fotométricos de lámparas y luminarias. Parte 1: Medición y formato de fichero*. Madrid, Octubre 2006.
- [UNE-EN 13201-2]** Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. *Iluminación de Carreteras. Parte 2: Requisitos de prestaciones*. Madrid, Diciembre 2004.
- [UNE-EN 13201-3]** Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. *Iluminación de carreteras. Parte 3: Cálculo de prestaciones*. Madrid, Noviembre 2005.
- [UNE-EN 13201-4]** Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. *Iluminación de carreteras. Parte 4: Métodos de medida de las prestaciones de iluminación*. Madrid, Noviembre 2005.
- [Welford 1989]** W.T Welford. *Aberrations of Optical Systems (Series in Optics and Optoelectronics)*. ISBN 0-85274-564-8. 1989
- [Wolfe 1998]** William L Wolfe. *Introduction to Radiometry*. SPIE Optical Engineering Press. 1998.
- [Zemax a 2010]** <<http://www.zemax.com>> Wide-angle 210° sample system, *systems* Sample file corresponding to sequential optical designs.
- [Zemax b 2010]** <<http://www.zemax.com>> Zemax manual document.
- [Zemax c 2010]** <<http://www.zemax.com>> Wide-angle 100° sample system, *systems* Sample file corresponding to sequential optical designs.

Bibliografía



Distribución porcentual de la bibliografía empleada.

