

DETECCIÓN DE LA ILUMINACIÓN EXTERIOR URBANA NOCTURNA CON EL SENSOR AEROTRANSPORTADO CASI 550

Anna Tardà, Vicenç Palà, Roman Arbiol, Fernando Pérez, Oriol Viñas, Luca Pipia y Lucas Martínez
Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

Parc de Montjuïc s/n,
08038. Barcelona, España

[{anna.tarda, vicenc.pala, roman.arbiol, fernando.perez, oriol.vina, luca.pipia} @icc.cat](mailto:{anna.tarda, vicenc.pala, roman.arbiol, fernando.perez, oriol.vina, luca.pipia}@icc.cat)

Palabras clave: CASI, iluminación urbana, contaminación lumínica, espectro visible, infrarrojo cercano, clasificación hiperspectral, visión fotópica, visión escotópica.

Resumen

El *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC) ha realizado un proyecto piloto solicitado por la *Oficina per a la Prevenció de la Contaminació Llumínica* (OPCL)¹ con el objetivo de estudiar la capacidad de la teledetección hiperspectral nocturna mediante el sensor aerotransportado CASI 550 para la detección e identificación de la iluminación exterior urbana.

Antes de iniciar el proyecto se comprobó si el sensor CASI era capaz de recoger información espectral durante la noche en una imagen panorámica terrestre de la ciudad de Barcelona. Tras comprobar la viabilidad de utilización del sensor en condiciones nocturnas se inició el proyecto tomando medidas espectrales en el laboratorio de las lámparas más comunes en la iluminación artificial de las calles y vías de Catalunya, continuó con la adquisición de imágenes CASI en dos vuelos sobre las zonas de Tarragona, Reus y la Bisbal de Falset en la provincia de Tarragona y terminó con la explotación radiométrica de las mejores imágenes hiperspectrales adquiridas.

Los primeros resultados demuestran que el sensor, diseñado para la captación de imágenes diurnas, posee una baja sensibilidad nocturna manifestada por la pérdida de intensidad en la señal espectral y la aparición del ruido electrónico del sensor. A pesar de estos inconvenientes se detecta información espectral en las zonas urbanas más iluminadas que permite discriminar diferentes tipos de iluminación. Cabe añadir que el sensor trabaja en un rango espectral mayor que el visible hasta llegar al infrarrojo cercano, permitiendo detectar emisiones espectrales de las lámparas fuera de la visión fotópica y escotópica y, por lo tanto, poco útiles para la iluminación exterior nocturna.

Los resultados de este trabajo muestran que las imágenes nocturnas del sensor CASI son un instrumento útil para la gestión y control de la iluminación artificial por parte de las administraciones públicas u otros organismos.

1 Introducción

En los últimos años y especialmente después de la aprobación de la Ley 6/2001 de la ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio ambiente [1], existe un creciente interés por controlar la iluminación artificial externa nocturna en Catalunya al igual que en otras grandes regiones urbanas y urbanizadas del planeta. El interés es manifiesto entre diferentes sectores de la sociedad para evitar una iluminación excesiva y superflua que conlleva un incremento innecesario del coste económico y genera un impacto ecológico en especies animales y vegetales, además del impacto visual que entorpece las observaciones astronómicas.

En términos técnicos no es fácil contabilizar el exceso global y sistemático de la luz artificial en nuestros pueblos o ciudades. La Teledetección puede aportar muchas técnicas y recursos aunque los resultados en este campo no son abundantes. Durante años sensores remotos como DMSP-OLS han generado imágenes nocturnas estudiadas por grupos de investigación sobre contaminación lumínica que han ayudado a demostrar que existe un exceso de luz en muchas zonas urbanas de la Tierra [2]. Pero estudios recientes concluyen que para poder avanzar en el estudio de la iluminación externa nocturna es necesario obtener mejor resolución espectral y espacial de las imágenes y un buen recurso serían las imágenes de alta resolución procedentes de un sensor hiperspectral [3]. En este sentido el ICC posee un sensor hiperspectral aerotransportado, el CASI 550, que puede recoger información en todo el espectro visible e infrarrojo cercano con unas resoluciones espaciales altas en condiciones diurnas. El reto se planteó al utilizar dicho sensor en condiciones nocturnas, ya que se le suponía poco sensible a condiciones de poca iluminación.

¹ La OPCL es la oficina para la prevención de la contaminación lumínica del gobierno catalán que ejerce las competencias para la aplicación de la normativa catalana sobre alumbrado nocturno para la prevención, control y corrección de la contaminación lumínica.

El estudio piloto que se presenta a continuación demuestra que aunque la falta de sensibilidad del CASI proporciona efectivamente una señal tenue en condiciones nocturnas eso no invalida su posterior explotación para identificar parte de la iluminación exterior nocturna.

2 Características básicas del sensor CASI 550-ICC

El sensor CASI del ICC fue adquirido en 1994 y desde entonces se calibra anualmente. El sensor es un radiómetro espectral diseñado para captar la luz reflejada o emitida por un material observado. A lo largo de los años se han realizado diversos proyectos para la adquisición de imágenes CASI y su explotación desde diferentes campos de la cartografía temática, especialmente en agricultura de precisión, en calidad de las aguas y en inventarios forestales. Las características básicas del sensor se describen en la tabla 1.

| Características | Datos |
|--|-------------------------|
| Intervalo espectral | ≈ 405 – 955 nm |
| Intervalo de una hilera espectral | 1,9 nm |
| Resolución espectral (FWHM) | 2,2 nm |
| FOV | 40,4° |
| Numero de bandas espectrales | máximo 288 |
| Control remoto de las aperturas de la óptica | 5 aperturas |
| Detectores del CCD | Array 550 |
| Señal del ruido | 600:1 (pico) |
| Rango dinámico | 14 bits |
| Niveles digitales del proceso | 16 bits (65536 valores) |

Tabla 1: Características básicas del sensor CASI 550

Las imágenes obtenidas con el sensor CASI se corrigen radiométricamente, con lo que los valores digitales (DN) de las imágenes originales se transforman en radiancias después de aplicar los coeficientes de calibración anuales del sensor, las correcciones del ruido electrónico y otros efectos inherentes a la captura digital de imágenes. La unidad de radiancia (SRU) se define como un microvatio por centímetro cuadrado por estereorradián por nanómetro para cada pixel y cada banda espectral ($1 \text{ SRU} = 1 \mu\text{Wcm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$).

Otras transformaciones, como la corrección atmosférica [4] o la corrección de los efectos bidireccionales de la señal para obtener la reflectividad de la iluminación, no han sido aplicadas y serían objeto de otros estudios.

Las imágenes también son corregidas geométricamente con el software propio del ICC obteniendo ortoimágenes hiperespectrales de la información lumínica exterior nocturna del territorio. Las imágenes nocturnas han sido orientadas a partir de orientaciones de vuelos diurnos consiguiendo un ajuste óptimo y muy similar al resto de las imágenes CASI.

3 Obtención de los datos hiperespectrales

El sensor CASI puede ser operado para obtener información espectral en condiciones diversas: en el laboratorio, en el exterior como radiómetro de campo (aunque hay instrumentos más adecuados para este uso) o embarcado en un avión desde donde adquiere imágenes que muestran el comportamiento espectral del territorio. Durante el desarrollo del proyecto se utilizó el sensor de los tres modos posibles. Inicialmente se tomaron imágenes oblicuas desde las instalaciones del ICC sobre la ciudad de Barcelona para realizar un primer experimento sobre la sensibilidad del instrumento a las fuentes luminosas de la ciudad, posteriormente se usó en el laboratorio para registrar los perfiles espectrales de las tres lámparas más comunes de la iluminación exterior nocturna proporcionadas por la OPCL y, para terminar, se procedió a la adquisición de datos hiperespectrales con dos vuelos sobre el eje de Tarragona-Reus-la Bisbal de Falset.

3.1 Simulación del vuelo

El sensor CASI fue instalado en la parte más alta del edificio de la sede del ICC, ubicado en la montaña de Montjuïc. Desde esta visión privilegiada de la ciudad se tomaron datos diurnos y, más tarde, nocturnos. La captación se basó en simular el barrido del vuelo rotando lentamente el sensor de forma horizontal para obtener una visión panorámica de la ciudad. Se usaron configuraciones espectrales de 288 y 144 bandas repartidas de

forma contigua en todo el espectro sensible del CASI y una configuración de 26 bandas coincidiendo con picos y zonas de absorción espectrales destacados según datos encontrados en la exigua bibliografía consultada [5].

Los resultados fueron escasos pero prometedores. Se registraron luces ubicadas a distintas distancias del ICC hasta llegar a detectar la Basílica del Tibidabo, situada a unos 6 km. Las señales eran muy débiles y sólo algunos píxeles de zonas fuertemente iluminadas generaron valores altos en picos espectrales de su señal. Los perfiles espectrales captados fueron determinantes para comprobar que el sensor era capaz de aportar información para discriminar distintos tipos de iluminación. Las respuestas espectrales también fueron altas en zonas del infrarrojo cercano, no referidas en buena parte de la bibliografía consultada ni en las especificaciones de las lámparas más comunes.

3.2 Obtención de firmas espectrales en el laboratorio

Una vez obtenidos los datos espectrales de poca intensidad relativos a la iluminación nocturna era necesario registrar la firma o signatura espectral de las lámparas más comunes de la iluminación urbana objeto del estudio. Se obtuvieron perfiles espectrales de tres lámparas: la de halogenuro metálico, la de vapor de mercurio y la de vapor de sodio de alta presión. En una primera adquisición se obtuvo información con el máximo detalle espectral posible, utilizando las 288 bandas del CASI. En la figura 1 se observan los picos y zonas de absorción espectrales más significativos para cada lámpara en unidades de radiancia. Cabe destacar el pico situado entre los 817 y los 819 nm en la zona del infrarrojo que claramente permite diferenciar las lámparas de vapor de mercurio de las restantes. Estas medidas fueron tomadas con un tiempo de integración muy alto para recoger les 288 bandas con nivel de señal suficiente, evitando llegar a la saturación.

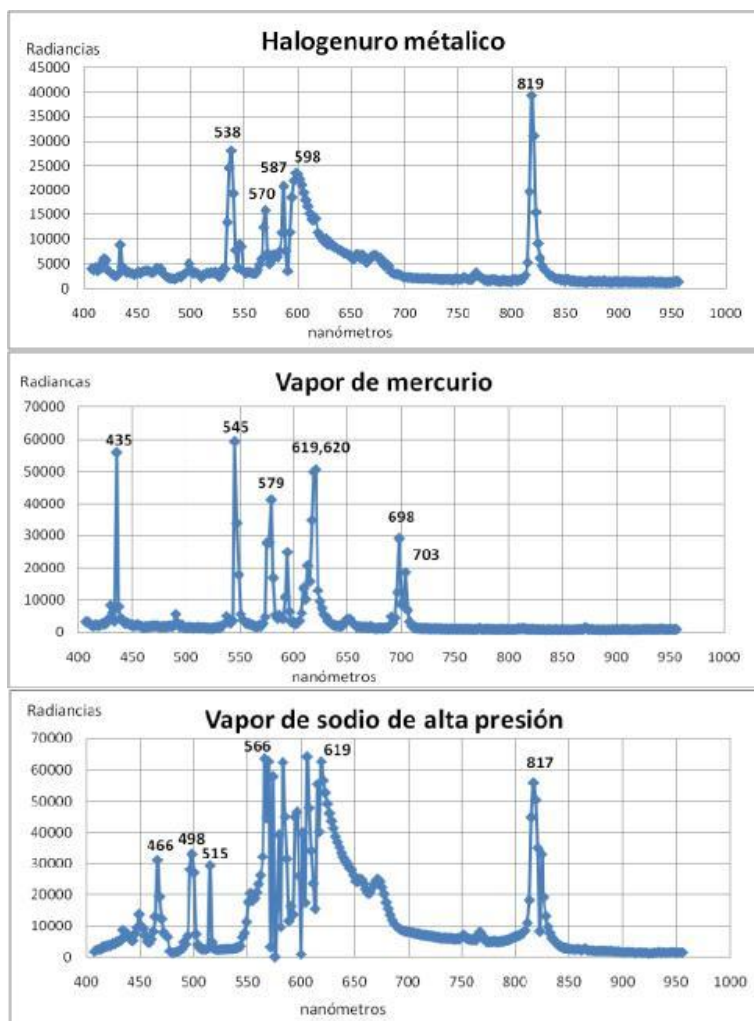


Figura 1: Firmas espectrales de las tres lámparas medidas con el sensor CASI en el laboratorio

Esta configuración espectral no era la más adecuada para usar en los vuelos ya que el tiempo de integración para la adquisición de los datos era demasiado elevado y generaría píxeles muy rectangulares, demasiado largos en la dirección *along track*. Por ello se estudió la posibilidad de simplificar las firmas espectrales en base a una adquisición que sumara hileras espectrales, para reducir así el tiempo de grabación de una línea CASI. Se usaron configuraciones de 144 y 96 bandas contiguas con una anchura espectral de 3,8 y 5,7 nanómetros respectivamente y se comprobó que las configuraciones con un número de bandas inferior a 96 no conservaban las “formas” básicas de la firma espectral de cada lámpara.

Durante esta fase se comprobó que estas lámparas estaban efectivamente presentes en las imágenes panorámicas nocturnas de Barcelona, adquiridas previamente, pero con respuestas espectrales de muy baja intensidad.

3.3 Vuelos de experimentación y vuelos definitivos

El 18 de noviembre del 2009 se realizó el primer vuelo de experimentación sobre el eje Tarragona-Reus-La Bisbal de Falset con el avión Partenavia propiedad del ICC. Se efectuaron diferentes pasadas a dos alturas, la primera a 1120 metros, con una resolución espacial nominal *across track* de 1.5 metros y la segunda a 2240 metros con una resolución de 3 metros. Se realizaron pasadas con diferentes tiempos de integración y configuraciones espectrales con diferente número de bandas según la altura y la velocidad del avión. El vuelo se realizó en horario de noche (legalmente se diferencia el horario de noche del horario nocturno) entre las 19 horas y las 20:30 horas, periodo donde la iluminación urbana nocturna es más abundante. Durante la explotación de los datos se comprobó que en las dos alturas se registraba información espectral de la iluminación y que 96 bandas espectrales eran suficientes para conservar la capacidad de discriminar tipos de iluminación.

Entre el día 11 y 12 de marzo del 2010 se realizó el vuelo definitivo con el avión Caravan propiedad del ICC. La altura de vuelo fue superior para sobrevolar mayor zona geográfica. Se conservó la configuración de 96 bandas espectrales y se añadió una nueva configuración de 29 bandas seleccionadas según los resultados del laboratorio y del vuelo experimental. La tabla 2 resume los parámetros principales del vuelo.

| Pasada | Altura | Velocidad | Tiempo de integración | Resolución espacial | Resolución espectral |
|--------|--------|-----------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| número | metros | nudos | milisegundos | metros | número bandas |
| 1 | 1500 | 120 | 65 | 2x4 | 29 |
| 2 | 1500 | 120 | 65 | 2x4 | 96 |
| 3 | 3000 | 122 | 95 | 4x6 | 96 |
| 4 | 3000 | 122 | 95 | 4x6 | 29 |

Tabla 2: Parámetros para cada pasada tomada en el vuelo del 11 de marzo del 2010

El vuelo se realizó en horario nocturno entre las 23:45 y la 1:00 de la madrugada. Durante el vuelo se observó la reducción de zonas iluminadas por estar en la franja horaria nocturna².

4 Resultados

4.1 Primeras consideraciones

Las imágenes nocturnas del CASI han recogido de forma parcial la iluminación exterior. Las calles donde la iluminación es pobre o las lámparas han sido bien colocadas para evitar la intrusión lumínica en el cielo nocturno no son visibles en las imágenes CASI o sólo parcialmente. A pesar de todo, las imágenes CASI tomadas en dos franjas horarias diferentes, según la Ley de ordenación del alumbrado, permiten comprobar el grado de cumplimiento de la normativa vigente [6]. En la figura 2 se muestra la misma zona industrial de la ciudad de Tarragona durante el horario de noche y nocturno.

² Según la Reglamentación de la Ley 6/2001 la franja horaria nocturna empieza a partir de las 20 horas UTC hasta la salida del sol. Durante este periodo el alumbrado debe reducirse y sólo se permiten los carteles luminosos que cumplan una función informativa para la localización de los servicios.



Figura 2: Diferentes iluminaciones entre la franja horaria de noche y nocturna en el noroeste de Tarragona. A la izquierda imagen CASI del 28/11/2009 a las 19:30 horas; en el centro el mapa ICC; a la derecha imagen CASI del 12/03/2010 a las 0:15 horas

Los resultados fueron satisfactorios para las imágenes de 96 bandas donde se reconocen los perfiles espectrales de las luces mientras que las imágenes de 29 bandas fueron más pobres espectralmente y quedaron descartadas para la posterior explotación de los datos.

4.2 Ensayos de clasificaciones hiperespectrales

Detectada la variedad espectral de las lámparas se procedió a realizar un par de ensayos para clasificar espectralmente las imágenes CASI. Uno de los principales problemas era la pobre relación señal/ruido de las imágenes. Durante la corrección radiométrica se habían aplicado algunas correcciones que resultaron insuficientes para maximizar la relación señal/ruido, así que durante los procesos de clasificación se usaron diferentes técnicas para sustraerlo, aunque con resultados limitados y con nuevos efectos no deseados.

El primer ensayo se basó en la clasificación supervisada a nivel de píxel (figura 3). Se identificaron zonas iluminadas de las imágenes que se adaptaran lo mejor posible al conjunto de las firmas espectrales de las lámparas tomadas en el laboratorio y se detectaron, además, lámparas de incandescencia. Durante este proceso de identificación también se observó que existían otras lámparas en el territorio no estudiadas en el laboratorio que podían considerarse como de otra clase. En principio podían corresponder a diferentes tipos de fluorescentes, lámparas de vapor de sodio de baja presión y *leds*, pero se desconocía su naturaleza espectral.

Una vez terminado el reconocimiento de píxeles se obtuvieron seis categorías de las cuales cuatro correspondían a las cuatro fuentes de iluminación conocidas, otra fue asignada a luces no conocidas y la sexta a zonas no iluminadas. Las zonas identificadas con estas categorías se subdividieron en dos grupos, uno para usar como áreas de entrenamiento durante la clasificación y el otro como áreas de test para la evaluación final de la clasificación.

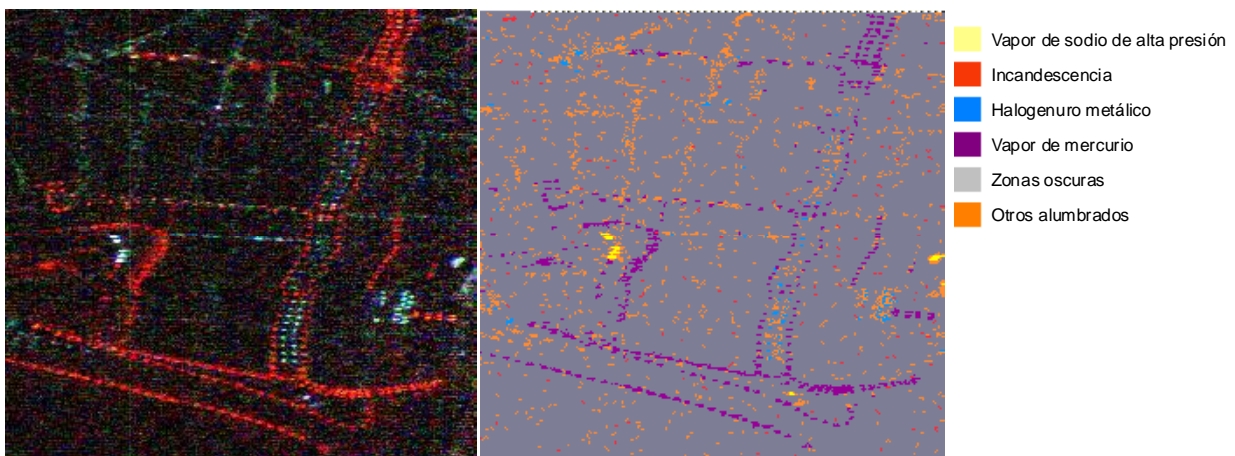


Figura 3: Centro urbano de Tarragona. A la izquierda imagen falso color, bandas 31, 34 y 73; a la derecha resultado de la clasificación a nivel de píxel de todas las bandas

La clasificación se realizó mediante el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper) para la imagen completa de 96 bandas. En la figura 3 se pueden ver los resultados en una subescena de la zona de Tarragona. La clasificación asigna los píxeles iluminados a las diferentes categorías con un predominio claro de las lámparas de vapor de mercurio, seguido por las de halogenuro metálico y vapor de sodio de alta presión. La categoría más abundante es la de las luces no identificadas que comprende diversos tipos de lámparas. Esta última categoría también incluye píxeles con ruido electrónico de la imagen, como puede verse en la parte inferior de la imagen que corresponde al mar, que se encuentra al lado del paseo marítimo de Tarragona.

El segundo ensayo consistió en tres etapas de proceso bien diferenciadas: el filtrado, la selección de áreas de entrenamiento y la clasificación basada en una segmentación previa (figura 4).

El primer paso fue el filtrado de los píxeles ruidosos con la selección de un subconjunto de las bandas más representativas dentro de las 96 bandas espectrales. Se seleccionaron cinco bandas (25, 31, 34, 38, 73) para reducir el nivel de ruido a partir de un filtro de mediana (5x5 píxeles).

A partir de los píxeles no filtrados se usaron las 96 bandas para determinar áreas de entrenamiento. Estas áreas corresponden a los píxeles que ofrecen mayor correlación espectral con los perfiles espectrales obtenidos en el laboratorio.

A continuación, se procedió a la segmentación o agrupación de píxeles vecinos similares, donde a cada segmento se le atribuye como valor espectral la mediana de los valores de los píxeles que lo constituyen. Una vez finalizado este proceso, el segmento, y no el píxel, se convierte en la unidad de asignación para la clasificación, en la que se usaron únicamente 11 bandas escogidas como las más representativas de las 96 disponibles. Se clasificó la imagen segmentada mediante el método *Nearest Neighbor*. La figura 4 muestra el resultado obtenido donde cada segmento clasificado obtiene un valor dentro de las 5 categorías.

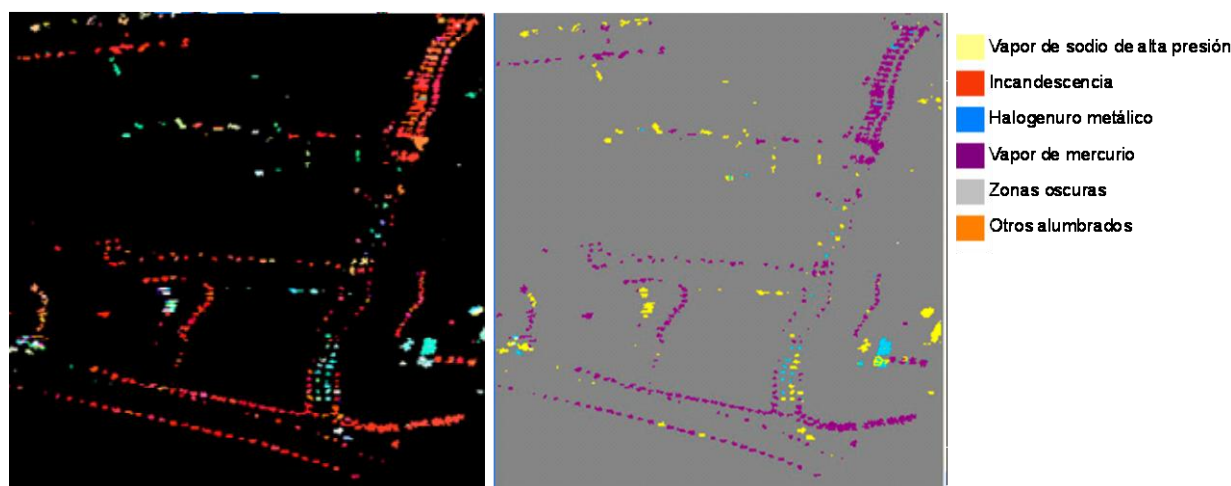


Figura 4: Centro urbano de Tarragona. A la izquierda, imagen filtrada en falso color, bandas 31,34 y 73; a la derecha, resultado de la clasificación por segmentación de las 11 mejores bandas

Los resultados de esta clasificación muestran una imagen más nítida. Todos los segmentos han sido clasificados con algún tipo de luz sin incluir zonas de ruido electrónico. Como efecto indeseado, un posible exceso de filtrado y segmentación ha producido una pérdida de parte la zona urbana que se intuía iluminada.

4.3 Aproximación al cálculo de luminancias

La sensibilidad espectral de la visión humana se sitúa aproximadamente entre los 400 y 700 nm del espectro electromagnético. Según las condiciones de mayor o menor iluminación, el ojo humano percibe en visión fotópica o visión escotópica, representadas en la figura 5. Las dos curvas representan las diferentes sensibilidades de los fotorreceptores del ojo humano, la primera tiene su máxima sensibilidad en los 550 nm y la segunda en los 507 nm.

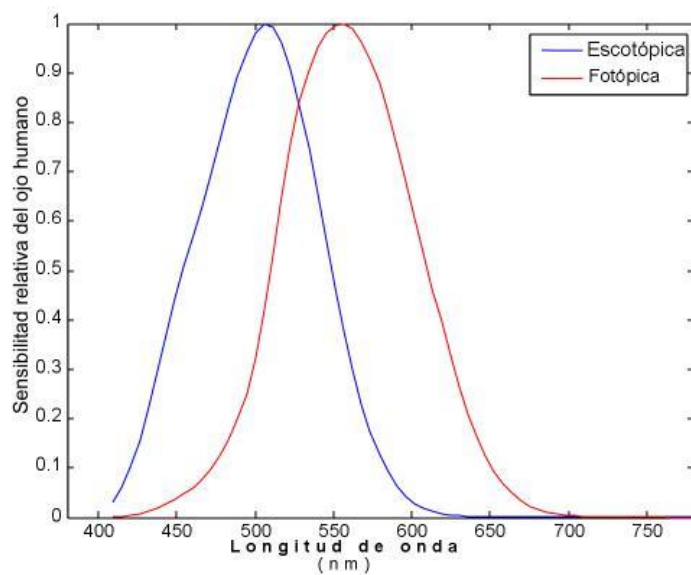


Figura 5: Respuesta espectral percibida por el ojo humano representada en la curva fotópica y la curva escotópica

Una vez analizados los diferentes espectros de la luz artificial sobre el territorio a partir de las imágenes CASI se comprueba que no toda la radiación de las lámparas es aprovechada por la visión del ojo humano. Para estudiar cuál es la cantidad de radiación que detecta la visión humana nocturna se han calculado las curvas fotópica y escotópica a partir de la señal CASI. El área de la sensibilidad para los dos tipos de visión ha sido calculada integrando cada curva con la parte común de las 96 bandas de la imagen hiperespectral tomada a 1500 metros de altura sobre la ciudad de Tarragona y transformado las radiancias a luminancias en unidades de candela (cd m^{-2}).

En la primera imagen de la figura 6 se muestra una subescena de la ciudad de Tarragona según la curva de la visión fotópica. Se puede observar que buena parte de la señal de las lámparas artificiales se encuentra en mayor o menor medida dentro de esta curva. Así los valores altos de luminancias son representados en los tonos más blancos, los tonos grises corresponden a luminancias inferiores a 6 cd m^{-2} , mientras que los tonos negros representan las zonas no iluminadas.

La segunda imagen es la misma zona pero calculando las luminancias para la curva escotópica. En este caso sólo algunas lámparas tiene luminancias más intensas que en la primera imagen, constatando que es en estas lámparas donde hay una radiación más alta en la parte azul del espectro.

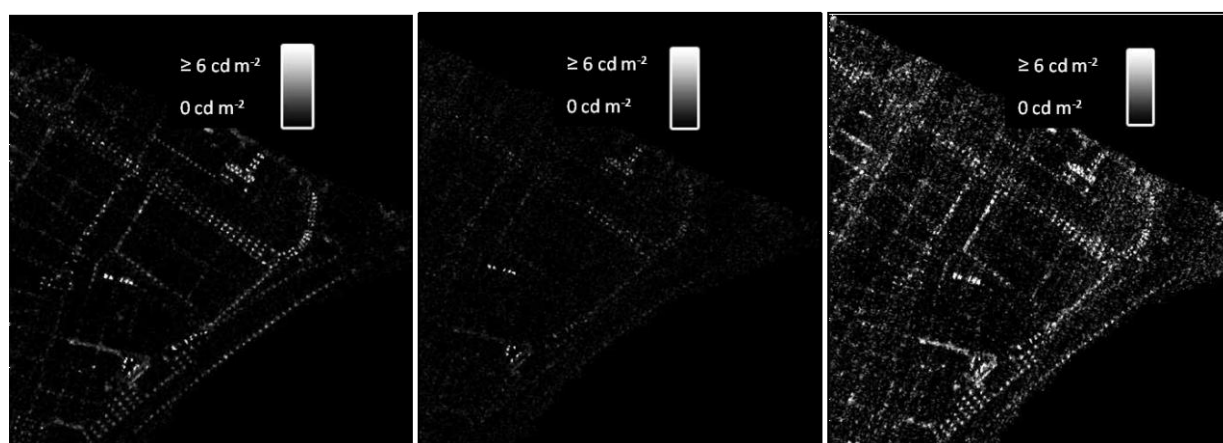


Figura 6: Representación de la señal del CASI según la visión fotópica (izquierda), la visión escotópica (centro) y la radiación total (derecha)

La última imagen representa la radiación total medida por el sensor CASI donde se emite mucha más señal que la detectable por la visión humana, obteniéndose valores totales en cd m^{-2} que no sólo incluyen la radiación espectral visible sino también toda la radiación del infrarrojo cercano y parte del ultravioleta.

5 Conclusiones

Las imágenes hiperespectrales CASI han sido útiles para obtener en el laboratorio la firma espectral de las emisiones de las lámparas más usadas en el alumbrado artificial exterior nocturno.

Gracias a estas medidas se ha observado que la información espectral de las principales lámparas no sólo se encuentra en el espectro visible, sino que también hay una parte de información relevante en el infrarrojo cercano. El pico espectral de 817-819 nm es clave para diferenciar las lámparas de vapor de sodio de alta presión y de halogenuro metálico de las lámparas de vapor de mercurio, las tres muy usadas en la iluminación nocturna de las zonas urbanas de Catalunya.

La alta resolución espectral del sensor CASI también ha ayudado a identificar picos espectrales dentro de la zona del azul, verde y rojo, para distinguir diferentes lámparas o tipos de iluminación. Esta alta resolución espectral se ha podido mantener en las configuraciones de vuelo para captar imágenes CASI del territorio, usando hasta 96 bandas contiguas de unos 6 nanómetros de anchura. Según la altura del vuelo, el píxel ha tenido resoluciones espaciales de 1.5, 2, 3 y 4 metros. Estos píxeles o conjuntos de píxeles han sido comparados mediante métodos de clasificación supervisada con los perfiles espectrales de laboratorio y los resultados han demostrado la existencia de una diversidad en el alumbrado exterior nocturno que va más allá de las muestras analizadas en el laboratorio.

El sensor CASI ha sido diseñado para ser sensible a las condiciones diurnas de captura de imagen y en condiciones de adquisición nocturna las imágenes presentan una intensidad baja o muy baja dificultando, bajo ciertas circunstancias, diferenciar la señal lumínica del ruido electrónico del propio sensor. Así pues, se detectan bastante bien las luces más intensas y sólo parcialmente el suelo iluminado. Para intentar resolver estos inconvenientes se han aplicado diferentes estrategias como usar el diafragma más abierto del sensor, alargar en la dirección *along track* el píxel original para poder aumentar el tiempo de integración de la señal, aplicar técnicas de reducción del ruido durante la corrección radiométrica de las imágenes y aplicar diferentes filtros para sustraer los píxeles de ruido de las imágenes finales. Estas medidas han ayudado a mejorar la relación señal/ruido y los resultados de la clasificación de las zonas iluminadas, aunque los resultados no son aún concluyentes.

El último paso ha sido realizar diferentes integraciones de la señal espectral del CASI para calcular la luminancia dentro del espectro visible, tanto según la curva fotópica como la curva escotópica en la imagen tomada entre Tarragona y Reus a 1500 metros de altura. Los mapas resultantes permiten la comparación de la señal por cada zona iluminada según estas dos curvas y la señal total del CASI que incluye, también, parte de la radiación ultravioleta y la radiación del infrarrojo cercano. Como resultado se deduce que existe una iluminación superflua importante no aprovechada por la visión humana.

En futuras etapas de trabajo se podrían mejorar diferentes aspectos para avanzar en el conocimiento espectral de la iluminación nocturna. Así por ejemplo, los resultados de las clasificaciones espectrales actuales podrían mejorar en una nueva fase de comprobación de datos sobre el terreno. También se podría incrementar la calidad de la señal realizando correcciones atmosféricas de las imágenes de acuerdo con las condiciones ambientales del mismo día de vuelo y también aplicar técnicas más refinadas de filtrado del ruido.

Después de este primer estudio se puede concluir que el sensor hiperespectral CASI es una herramienta útil para dar soporte a la normativa vigente sobre la ordenación del alumbrado exterior nocturno a pesar de sus limitaciones en cuanto a sensibilidad bajo condiciones de poca iluminación.

Referencias

[1] Ley 6/2001 del 31 de mayo sobre la ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno. (Generalitat de Catalunya)

[2] Elvidge, C.D; et al., 2007: The Nightsat mission concept. International Journal of Remote Sensing, Vol 28, nº 12, pp. 2645-2670

[3] Elvidge, C.D; et al., 2010: Spectral Identification of Lighting Type and Character, Sensors, 10, pp 3961-3988

[4] Etzion, Y et al., 2010: Nighttime near-ground hyperspectral imaging for urban scale remote sensing of aerosols. Presentación en Hyperspectral Workshop 2010 ESRI Frascati.

[5] Barducci, A. et al, 2006: Hyperspectral remote sensing for light pollution monitoring, *Annals of Geophysics*, vol. 49, N. 1

[6] Reglamento 82/2005, del 3 mayo, para el desarrollo de la Ley 6/2001 (Generalitat de Catalunya) sobre la ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno.