

Título del trabajo/ Title of paper

Aplicación de fotometría para la medida de la contaminación lumínica

Autor/es/ Author/s

Susana Malón Giménez

Afiliación/es del autor/es/ Affiliation/s of the author/s



Dirección principal/ Mail adress

C/ Florida, 42
01005 Vitoria-Gasteiz

Teléfono, fax, e-mail de la persona de contacto/
Phone, fax number and e-mail adress of the contact person

Teléfono: 945 043346
Móvil: 605063570
Correo electrónico: susana.malon@luminicaambiental.com

Tema:

Divulgación

1. Alumbrado interior y Luz natural
2. Aspectos generales de la iluminación
3. Científico y Formación
4. Divulgación
5. Economía de la iluminación
6. Eficiencia Energética
7. Fotobiología, Fotoquímica y UV
8. Fotometría y Luminotecnia
9. Fuentes de luz
10. Iluminación y Señalización para el transporte
11. Imagen
12. Informática
13. Investigación y Desarrollo
14. Los LEDs y sus aplicaciones
15. Luz y Salud
16. Normativa y Legislación
17. Novedades
18. Realizaciones
19. Visión y color

1.- RESUMEN

En este trabajo se describen las técnicas de medida de la contaminación lumínica aplicando fotometría astronómica o estelar, que es la forma más precisa para medir este vector ambiental, indicando de forma general la metodología a aplicar y la instrumentación a utilizar.

Como cualquier contaminante ambiental es necesario disponer de datos cualitativos para hacer una valoración objetiva de la situación de partida de un territorio y poder hacer su seguimiento en el tiempo, comprobando los cambios implantados en los sistemas de iluminación artificial que pueden mejorar la calidad ambiental del cielo nocturno.

El parámetro que se mide es el brillo artificial del fondo del cielo, que junto con otros parámetros como el seeing y la transparencia, son los que caracterizan la calidad del cielo nocturno de un territorio.

Existen otros métodos de medida del brillo del fondo del cielo menos precisos, como son la utilización del fotómetro denominado SQM (Sky Quality Meter), cuyo uso es relativamente sencillo y el reconocimiento y conteo visual de estrellas de ciertas partes del cielo nocturno y compararlas con cartas celestes normalizadas (por ejemplo las zonas MALE).

El sistema o equipo de medida que permite cuantificar la contaminación lumínica de un territorio basado en fotometría estelar, que se presenta en este trabajo, está compuesto por un telescopio, una cámara CCD y filtros fotométricos.

Pero a parte de la instrumentación y el conocimiento de la técnica a aplicar, es necesario que la noche sea fotométrica, es decir, con unas condiciones estables en cuanto a la transparencia del aire.

Esto implica esperar a la noche casi perfecta para que los datos de las medidas realizadas sean realistas y contrastables, lo que a veces según el territorio puede ser complicado. Si existen interferencias atmosféricas durante la toma de medidas para calcular el brillo del fondo del cielo, éstas necesariamente deben ser descartadas.

1.- INTRODUCCIÓN

La noche fotométrica existe, aunque cueste esperarla y sea difícil encontrarla. Son un cúmulo de condiciones naturales y atmosféricas favorables que dan estabilidad a la noche, especialmente en cuanto a transparencia del aire se refiere.

Es entonces cuando podemos realizar las medidas del brillo del fondo del cielo y obtener valores reales y que puedan utilizarse para hacer una valoración cualitativa de la contaminación lumínica, como la noche que se presenta en las fotografías siguientes, a pesar del resplandor luminoso sobre el horizonte:



Fotografía 1: Cielo norte, fotografía tomada con 25 segundos de exposición.



Fotografía 2: Cielo norte y baile circumpolar alrededor de la Estrella Polar.

Composición de 215 fotografías de 25 segundos de exposición (como la anterior) y con 1 sg entre toma y toma.

Por supuesto, tampoco podemos medir en lugares donde la luz artificial de las luminarias pueda afectar directamente a las medidas porque entonces ya no estaremos midiendo el brillo artificial del fondo del cielo, sino la iluminación urbana.

2.- FOTOMETRÍA Y UNIDADES.

La fotometría estelar nos permite determinar el brillo de objetos celestes, como las estrellas, a partir de técnicas precisas, contrastadas y utilizadas en Astronomía, mediante la captación de su intensidad en distintos filtros (o rangos de longitud de onda dentro del espectro), aplicando un tratamiento a los datos e imágenes tomadas (corrección de errores) y finalmente comparando esta luz con la de otras estrellas que ya están calibradas y catalogadas y de las cuales se conocen sus características (magnitud estelar aparente, m) en cada uno de los filtros.

La expresión de este parámetro es: $m = C - 2.5 \log_{10} F$, donde C es un valor constante y F el valor del flujo luminoso de la estrella captado en cada filtro de medida, que puede ser V, R, B, etc.

Cuanto más brillante es una estrella menor es su magnitud estelar aparente. Así por ejemplo la estrella Vega (de la Lira) tiene una $m = 0$ en el filtro V (visible) y Sirio, la estrella más brillante, $m = -1,5$. El Sol $m = -27$ y la luna llena $m = -13$. El ojo humano puede llegar a detectar estrellas hasta $m = 6$.

Entonces, ¿por qué no utilizar esta misma técnica para medir el brillo del fondo del cielo?

Es medir una parte del cielo en lugar de un objeto celeste en concreto, pero debemos tener en cuenta que una estrella es una fuente luminosa puntual, con valores fotométricos conocidos si está calibrada, como se acaba de comentar. Sin embargo, el fondo del cielo no es puntual, sino superficial con mayor o menor extensión, según la zona que queramos estudiar, por lo que se debe referir su energía luminosa a un área.

En este sentido, hablamos de magnitudes estelares por unidad de superficie, que en el caso de la esfera celeste, sería el área que subtiende un ángulo sólido de un segundo de arco cuadrado. Así que las unidades que utilizaremos para medir la contaminación lumínica, entendida como el brillo aparente de un trozo de cielo, que no contenga estrellas y medido desde la Tierra, serán magnitudes por arco segundo al cuadro ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$).

Para hacernos una idea del significado de estas unidades, podemos decir que en un cielo no contaminado el valor de este parámetro debe ser superior a $21,5 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. En la tabla que sigue se muestra las distintas calidades del cielo con sus respectivos valores:

Mag/arcsec ²	Cielo (estado)
< 19,5	Fuertemente luminoso
20,0	Muy luminoso
20,5	Luminoso
21,0	Poco luminoso
21,5	Medianamente oscuro
> 21,5	Muy oscuro

3.- INSTRUMENTACIÓN.

Para realizar este tipo de medidas son necesarios equipos usados en Astronomía y que consisten en:

- **Telescopio**, preferiblemente automatizado, para poder realizar el seguimiento de las estrellas a lo largo de la noche.
- **Cámara CCD** astronómica, *Charge Coupled Device* o *Dispositivo de Carga Acoplada*, para captar la luz y obtener la imagen durante un tiempo de exposición adecuado.
- **Conjunto y rueda de filtros**, normalmente sistema de Jhonson-Cousins: B, V y R, para hacer las medidas en cada uno ellos, puesto que la energía difiere de unos a otros. Es necesario este análisis para el estudio en cuanto al impacto de la contaminación lumínica en las observaciones astronómicas, dado que en Astronomía se trabaja en distintos rangos espectrales que son fundamentales para analizar distintos tipos de fenómenos.

En este punto, cabe destacar que el fotómetro SQM sólo mide en el filtro V, lo cual resulta ser una limitación en función del objetivo que se persiga con la realización de estas medidas, especialmente cuando se quiere valorar el grado de contaminación lumínica del cielo nocturno para el desarrollo de observaciones astronómicas.

En la imagen siguiente se muestra el instrumental básico para hacer este tipo de medidas:



Fotografía 3: Instrumental para la realización de medidas de la contaminación lumínica con fotometría estelar
Telescopio (izda.), cámara CCD (centro), juego y rueda de filtros (dcha.)

4.- ASPECTOS A CONSIDERAR

El aspecto fundamental de esta técnica de medida es que debemos comparar el brillo del cielo que hemos captado con nuestro instrumental (**magnitud instrumental**), con el brillo de estrellas puntuales que están catalogadas y de las cuales se conoce su **magnitud estelar aparente** en distintos filtros fotométricos y su posición, pero medidos fuera de la atmósfera.

Por tanto, antes de continuar con la técnica a utilizar es esencial considerar estos aspectos claves:

1.- El resultado de la medida realizada con el equipo, es decir, la **magnitud instrumental** se obtiene en **número de cuentas**, y debemos convertirlas en unidades comparables con las de las estrellas de referencia de los catálogos, es decir, en magnitudes estelares.

2.- Que estamos midiendo desde la Tierra y la atmósfera se interpone entre el espacio estelar y nosotros, por lo que la energía luminosa que recibimos y medimos, es inferior a la que existe en las capas altas de la atmósfera.

Es decir, que estamos afectados por la fina capa atmosférica (que permite el milagro de la vida en nuestro planeta) y debemos corregir su efecto en nuestras medidas para poder compararlas con las de las estrellas de referencia y que ya están calibradas (pero fuera de la atmósfera).

Además, la atenuación de la luz procedente de las estrellas y del fondo del cielo, varía en función de la altura en la que se encuentre el objeto en el cielo respecto al horizonte del lugar, dado que varía la masa de aire que atraviesa. Por lo tanto, debemos medir a distintas alturas varias estrellas de brillo conocido para obtener el valor cuantitativo de la **corrección del efecto introducido por la atmósfera**. Es el denominado **coeficiente de extinción**, que tiene una relación directa con las condiciones meteorológicas y que varía cada noche e incluso en la misma noche. Por eso, una noche fotométrica para poder hacer las medidas, es aquella en la que este coeficiente se mantiene estable.

3.- Como en cualquier instrumentación, hay un **error del propio equipo de medida**. Influye tanto el equipo en sí como el tiempo de integración utilizado para la toma de las imágenes. Este resulta sencillo de corregir, dividiendo el nº de cuentas detectado por la CCD entre el tiempo de integración en segundos.

El error debido al propio instrumental (sistema telescopio, CCD y filtros) debe corregirse realizando varias medidas (cuantas más mejor), en cuentas por segundo, a distintas estrellas de brillo conocido en cada uno de los filtros y a poder ser en diferentes noches para comprobar la estabilidad de nuestro instrumental.

Así se obtiene la constante instrumental o el denominado **punto cero** de nuestro equipo de medida para cada filtro utilizado, que debe hacerse una vez se haya corregido la extinción atmosférica.

Resumiendo, para poder comparar nuestra magnitud instrumental con la magnitud estelar de catálogo, debemos conocer el punto de cero de nuestro equipo y la extinción atmosférica para aplicarlos a nuestra medida instrumental. Así ya estamos en disposición de hacer las medidas.

5.- PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Una vez considerados todos los condicionantes anteriores y previamente al proceso de la toma de datos, es necesario elegir las estrellas de referencia sobre las que comparar y calibrar nuestras medidas del fondo del cielo. Se recomienda el catálogo de las **estrellas Landolt**.

Ahora ya estamos en disposición de comenzar con la campaña de medidas para obtener un valor cuantitativo de la contaminación lumínica, lejos de subjetividades y suposiciones, cuyo procedimiento se resume en los pasos siguientes:

1. Realizar varias tomas al grupo de estrellas Landolt, al menos 5, y que cubran en la bóveda celeste alturas desde $h = 30^\circ$ sobre el horizonte (equivalente a una masa de aire 2) hasta el cenit, es decir $h = 90^\circ$ y masa de aire la unidad, para considerar la extinción atmosférica. Por debajo de 30° se deben descartar las medidas.

La señal de estas tomas incluye la **luz de las estrellas de referencia** pero **también parte de la luz del fondo del cielo** donde se localizan, por lo que debe de restarse su contribución.

2. Realizar varias tomas hacia la parte del cielo próximo a las estrellas pero que no incluyan su brillo, con el objetivo de estimar la **contribución del brillo del fondo del cielo**. Si esta contribución se resta a las primeras tomas, se obtendrá la medida de la estrella estandar de calibración.

Para ello, de las tomas de las estrellas de referencia y tras su tratamiento para eliminar posibles artefactos o defectos sobre las imágenes astronómicas y restando la contribución del fondo del cielo, se obtienen las medidas de la luminosidad de las estrellas estandar en nº de cuentas por segundo y su magnitud instrumental, junto a la masa de aire de cada punto de observación.

El tratamiento matemático de todos los valores de la magnitud instrumental (medida), frente a la magnitud estelar (conocida) a diferentes masas de aire, nos permite obtener tanto el punto cero de nuestro instrumento, como el coeficiente de extinción.

3. Finalmente se deben tomar varias fotografías del fondo del cielo en la zona del cenit, en un área cuadrada y libre de estrellas. Así se obtiene el nº de cuentas por segundo de la señal procedente del fondo del cielo en un área cuadrada de un segundo de arco de lado, y por tanto su magnitud instrumental por segundo de arco al cuadrado.

Por último, como ya se ha comentado anteriormente para poder utilizar magnitudes comparables con las estandar, es necesario aplicar la corrección del punto cero del instrumento, obteniendo así el valor del **brillo del fondo del cielo en el cenit en magnitudes por arco segundo al cuadrado**. En este caso no es necesario aplicar la corrección por el coeficiente de extinción, dado que la medida es el cenit, es decir con $h = 90^\circ$ y masa de aire la unidad.

Este procedimiento debe hacerse en cada uno de los filtros, para dar el valor de la contaminación lumínica en $\text{mag}/\text{arsec}^2$ en filtros V, B y R.

6.- CONCLUSIONES

Esta metodología de medida basada en fotometría estelar (homologada y aplicada por astrónomos profesionales) está siendo contrastada por el equipo técnico de Lumínica Ambiental, con el objetivo de aplicarlo para la realización de medidas de caracterización del brillo del fondo del cielo en distintos territorios, junto con otros parámetros importantes relacionados con la calidad del cielo nocturno, como son el seeing (turbulencia) y transparencia.

Con este procedimiento se garantiza la calidad de los resultados y permite que las mediciones puedan ser utilizadas para que un territorio gestione con garantías, la problemática de la contaminación lumínica partiendo de datos cualitativos reales y seguir la evolución de los mismos, para controlar objetivamente las actuaciones de mejora en el alumbrado exterior que se vayan ejecutando.

También permiten que un territorio pueda optar a la certificación y adhesión a distintas iniciativas internacionales en defensa del cielo estrellado, como por ejemplo Starlight, respaldada por la UNESCO, la Organización Mundial del Turismo, Man&Biosphere y Comité Internacional de Iluminación, entre otras.

Además, no sólo se consiguen medidas precisas de este vector ambiental, sino que además permite calibrar el fotómetro SQM, método más sencillo y manejable y así poder utilizarlo eficazmente para realizar un mayor número de medidas a lo largo de una noche y barrer una mayor parte del territorio.

Sin embargo, con este fotómetro sólo es posible medir en el filtro V, por lo que no se puede obtener el color del brillo del fondo del cielo, que es un parámetro de vital importancia para zonas de especial interés para la investigación científica a través de la observación astronómica.

En el próximo simposium se presentarán medidas concretas realizadas con esta técnica y el análisis de las mismas para determinar el grado de contaminación lumínica de varias zonas. Se busca además, agilizar esta técnica de medida para poder hacer mediciones en distintos puntos de un territorio con esta metodología en una misma noche.

Referencias:

Medidas de brillo artificial del cielo nocturno: instrumentación y metodología.
CONAMA2009.

David Galadí-Enríquez. Centro Astronómico Hispano-Alemán (Observatorio de Calar Alto).

Stato del cielo notturno e inquinamento luminoso in Italia“.

Pierantonio Cinzano, Fabio Falchi, Christopher D. Elvidge.