



– Panorama diurno del Observatorio de Calar Alto en la sierra de los Filabres, sudeste de la península Ibérica. Santos Pedraz / Calar Alto

CONTAMINACIÓN LUMÍNICA: LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LA ATMÓSFERA Y SUS IMPLICACIONES PARA LA ASTRONOMÍA

El primer paso para el diagnóstico y la corrección de un problema medioambiental consiste en su caracterización. De ahí que antes de abordar otros aspectos relacionados con la contaminación lumínica convenga formular una definición razonada del fenómeno. De entre las muchas definiciones de contaminación lumínica que pueden encontrarse, una de las más generales fue propuesta por P. Cinzano y sus colaboradores en 2000: *la alteración de los niveles naturales de luz en el ambiente exterior debido a fuentes de luz artificiales*. Esta formulación compite en carácter general con la aprobada en 2009 por la Iniciativa Starlight: *introducción de luz artificial por parte de los seres humanos en el entorno, de manera directa o indirecta*. Desde estos puntos de vista tan generales, todo alumbrado nocturno es contaminante y solo cabe tratar de diseñarlo de manera que las perturbaciones que induzca resulten mínimas.

Otro grupo de definiciones muy difundidas en nuestro entorno restringen el concepto de contaminación lumínica a la parte adversa o evitable de la emisión de luz artificial. Según este enfoque, iniciado en el texto de la ley catalana de alumbrado de 2001, se enten-

dería por contaminación lumínica *la emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas con intensidades, direcciones o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona donde se han instalado las luces*. Una formula-

ción así tiene la ventaja de enumerar los factores relevantes del problema y, por tanto, apunta ya de entrada a posibles soluciones que tengan en cuenta la intensidad del alumbrado, la dirección en la que se orienta y el color de las lámparas utilizadas.



– Una imagen en apariencia anodina del cielo diurno ilustra los dos mecanismos relevantes en la interacción de la luz con la atmósfera: el esparcimiento de Rayleigh responsable del color azul y el esparcimiento de Mie relacionado con el color blanco de las nubes. En la Luna, sin atmósfera, el cielo es negro incluso a plena luz del día. La interacción de la luz con la atmósfera de Marte está dominada por el esparcimiento de Mie sobre aerosoles que tienen su origen en el polvo de la superficie. El color del polvo se «contagia» al cielo diurno. David Galadí / NASA / JPL

**Cada longitud de onda de luz visible
induce una sensación de color diferente**



→ Una comparación de panoramas nocturnos ilustra los efectos de la contaminación lumínica. Arriba, panorámica obtenida cerca de Mahide (Zamora), en un lugar medianamente oscuro; abajo, cerca de Ciguñuela (Valladolid). Las letras en la parte inferior señalan los puntos cardinales. Fernando Cabrerizo

La luz en la atmósfera

La luz visible se puede tratar como un caso particular de onda electromagnética. Las ondas electromagnéticas se producen cuando una carga eléctrica experimenta una aceleración. Como toda onda, la onda electromagnética se caracteriza por su amplitud (intensidad), longitud de onda (λ , distancia entre crestas sucesivas) y velocidad. Un concepto análogo al de longitud de onda es el de frecuencia. Se refiere al número de crestas que pasan por un lugar determinado cada segundo.

Las ondas electromagnéticas de todas las longitudes de onda (de todas las frecuencias) constituyen el espectro electromagnético, desde los rayos gamma ($\lambda < 0,02$ nm) hasta las ondas de radio (con longitudes de más de diez centímetros). A grandes rasgos, la luz visible corresponde al intervalo de longitudes de onda entre 400 y 700 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, una millonésima de milímetro). Desde el punto de vista de la percepción, cada longitud de onda de luz visible induce una sensación de color diferente, desde las longitudes de onda cortas que corresponden al color violeta, hasta las longitudes de onda largas que dan la sensación de rojo.

La atmósfera terrestre contiene partícu-

las de dos categorías: moléculas de gases y partículas en suspensión, los aerosoles.

Las moléculas de nitrógeno y de oxígeno miden unas 200 milésimas de nanómetro, es decir, son unas mil veces más pequeñas que la longitud de onda de la luz visible. Cuando la radiación electromagnética interacciona con partículas mucho más pequeñas que su longitud de onda, se aplica la teoría del esparcimiento¹ de Rayleigh.

La luz incide sobre las moléculas y agita sus nubes electrónicas. Así se sustrae parte de la energía al rayo luminoso. La agitación de las cargas eléctricas de las cortezas y núcleos atómicos hace que se reemita esa energía en forma de radiación electromagnética de nuevo, pero en una dirección aleatoria. El resultado neto es que la luz incidente puede ir rebotando de molécula en molécula y termina esparciéndose en el seno de toda la masa del gas. Es muy importante insistir en que este proceso se verifica incluso en el seno de gases puros, sin aerosoles ni contaminantes de ningún tipo.

La intensidad del esparcimiento de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda: cuanto más corta sea la longitud

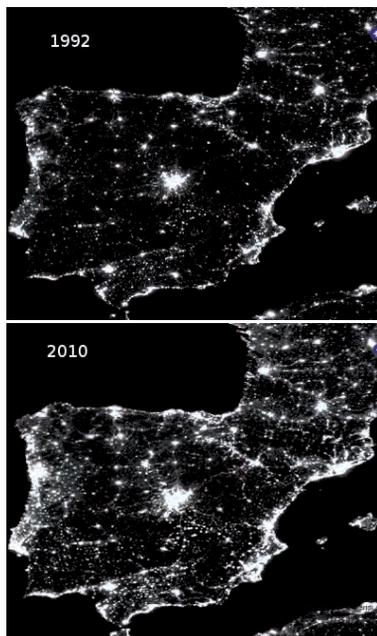
de onda, más tiende a esparcirse la luz en el seno del gas. El efecto Rayleigh alcanza una intensidad cuatro veces mayor para la luz azul que para la roja, y llega a ser trece veces mayor para la luz ultravioleta que para la roja. Por tanto el cielo es azul porque el mecanismo de interacción entre la luz y las moléculas del aire (independiente de su composición química) favorece muchísimo el esparcimiento de los tonos de longitud de onda corta, mientras que tiene poca intensidad para las longitudes de onda largas.

Consideremos ahora no las moléculas gaseosas, sino partículas en suspensión, los aerosoles. En este caso se trata de partículas con tamaños similares a la longitud de onda de la luz. Los aerosoles pueden tener diversos orígenes: contaminación atmosférica, polvo, aerosoles de origen marino o las nubes (sean de gotas líquidas o de cristales de hielo). En este caso, con partículas semejantes en tamaño a la longitud de onda, se aplica la teoría del esparcimiento de Mie.

En este proceso, la luz incide en las partículas y estas la reemiten pero no en direcciones aleatorias, sino en direcciones muy semejantes (aunque no idénticas) a las de partida. Cuando hay alta densidad de aerosoles (nubes, o en ciertas ocasiones, calimas en capas bajas de la atmósfera) el

El efecto Rayleigh alcanza una intensidad cuatro veces mayor para la luz azul que para la roja

¹ En muchos textos se emplean las palabras «dispersión» o «difusión» en vez de «esparcimiento», pero es esta última la más adecuada de acuerdo con la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Los términos ingleses para dispersión, difusión y esparcimiento son, respectivamente, *dispersion*, *diffusion* y *scattering*.



→ Evolución de la contaminación lumínica en la península Ibérica. DMSP / NOAA / José Gómez Castaño. Existe un visualizador de mosaicos de imágenes nocturnas del mundo desde 1992 hasta la actualidad en la página web: www.meridi.es/astro/cielooscuro/evolucion.php

esparcimiento múltiple (esparcimiento sucesivo en varias partículas) adquiere relevancia y la luz llega a desviarse mucho en virtud del efecto Mie, a través de la interacción con muchas partículas de manera consecutiva.

El esparcimiento de Mie presenta una dependencia inversa ligera (lineal) con la longitud de onda, de modo que la luz azul tiende a esparcirse un poco más que la roja por este efecto.

Contaminación lumínica y astronomía

No hay grandes diferencias entre los mecanismos que operan en la interacción de la luz con la atmósfera durante el día y durante la noche. Así como de día el cielo es azul, también lo es de noche (aunque no lo parezca) cuando hay Luna. Y la luz de origen artificial también se propaga por el aire obedeciendo las leyes físicas comentadas. Uno de los resultados de la introducción de luz en la atmósfera consiste en

el esparcimiento de parte de ella, lo que confiere al fondo de cielo un resplandor que puede perjudicar los estudios astronómicos de diferentes maneras. A este respecto conviene distinguir los estudios espectroscópicos de aquellos otros efectuados por medio de imágenes directas (fotografías).

Cuando las lámparas emiten en muy pocas longitudes de onda, entonces solo una parte limitada del espectro se ve afectada y quedan amplias regiones libres para su estudio espectroscópico. No obstante, en ocasiones ocurre que líneas de emisión usadas en lámparas de alumbrado público quedan demasiado cerca, en el espectro, de longitudes de onda clave para el estudio de objetos celestes. Además, las lámparas de descarga utilizadas para generar luz blanca contienen muchas líneas sobre un cierto espectro continuo de fondo, de modo que en la práctica quedan pocas zonas espectrales libres. La luz de sodio a baja presión es la que menos afecta los estudios espectroscópicos porque al ser casi monocromática deteriora solo un punto concreto de los espectros. No puede decirse lo mismo de ninguna otra fuente de luz utilizada hoy día en alumbrado de exteriores.

La situación es distinta cuando se considera no el análisis espectral, sino la toma de fotografías directas. Cuando se obtiene una imagen a través de un filtro determinado, toda la luz que atraviesa el filtro queda registrada de manera conjunta sin posibilidad de distinguir qué parte correspondía en origen a cada longitud de onda. Así, por ejemplo, la luz de sodio a baja presión, si bien ejerce un efecto limitado sobre los estudios espectroscópicos, resulta muy molesta para los análisis fotométricos porque su longitud de onda de emisión (589,3 nm) cae dentro de las bandas de los filtros V y R. Cualquier lámpara no monocromática posee emisión que abarca grandes regiones del espectro y perjudica de manera inevitable los estudios fotométricos con filtros muy diversos.

Conclusiones

De lo antedicho cabe extraer algunas conclusiones que vale la pena subrayar:

- El resplandor artificial del cielo nocturno se produce incluso en ausencia de aerosoles (de origen natural o artificial). El esparcimiento de Rayleigh garantiza que siempre habrá contaminación lumínica incluso en una atmósfera limpia y seca.
- No es posible filtrar la luz de fondo y sustraerla en la toma de imágenes directas, con independencia de su composición espectral.
- Cuando se usa luz monocromática (en la práctica, solo sodio a baja presión) se puede salvar la información espectral, pero cualquier lámpara que no sea monocromática afecta regiones muy amplias del espectro, y aún más las lámparas de espectro continuo (como los LED blancos).

Para terminar, de lo explicado en este artículo se desprenden algunos principios básicos que, en caso de tenerse en cuenta en las instalaciones de alumbrado, pueden contribuir a reducir la contaminación lumínica y sus efectos perjudiciales sobre la oscuridad natural del cielo nocturno:

- Hay que evitar la emisión directa de luz hacia la atmósfera.
- La luz reflejada en pavimentos y fachadas también se esparce en la atmósfera. Esta componente solo se puede limitar ajustando los niveles de alumbrado a lo razonable, iluminando solo aquello que realmente sea necesario y haciéndolo en los horarios en los que de verdad tenga sentido.
- La luz amarilla y anaranjada contamina menos porque se esparce mucho menos que la azul. La luz blanca (por su contenido en luz azul) es un recurso que debe administrarse con mesura. La luz de sodio a alta presión es preferible a otras no por ser de sodio, sino por ser amarillenta. ■

La introducción de luz en la atmósfera confiere al fondo de cielo un resplandor que puede perjudicar los estudios astronómicos

El doctor David Galadí es astrónomo en el Centro Astronómico Hispano Alemán (Observatorio de Calar Alto), en Almería.