

Título del trabajo/ Title of paper

Impacto de las instalaciones led en la reducción o incremento de la Contaminación lumínica. Modelos y medidas desde satélite.

Autor/es/ Author/s

Alejandro Sánchez de Miguel

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

Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC

Dirección principal/ Mail adress

asanchez@iaa.es

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

619358685

Tema:

Contaminación lumínica

En la actualidad existe un vivo debate sobre si la instalación de la tecnología LED supone un beneficio o un perjuicio para la potencial para los ecosistemas, la observación astronómica y la salud humana. Aunque quizás lo más alto de este debate llegó con el informe publicado por la Asociación Médica Americana¹ y la respuesta del Light Reserach Center². Sin embargo, este debate no es nuevo y ya en 2004 tratábamos los riesgos y beneficios de los LEDs en el artículo “Iluminación LED: Un arma de doble filo”³.

Los modelos

El primer modelo que intentó explicar el impacto de la conversión de las lámparas de sodio de alta presión a LED fue Bierman 2012⁴, el cual predecía un incremento de entre el 10-20% usando lámparas de 6050K. Sin embargo, sus resultados fueron desmentidos por Aubé et al 2013⁵, Lurimbur et al 2014⁶ que predicen un aumento del impacto de entre un 76%(2400k) y un 241%(5100k) a una distancia de 3 km de la fuente. Sin embargo, existen una gran cantidad de variables además del espectro que deben ser tenidas en cuenta para estudiar el caso completo, y no solo el espectro. El Flujo Hemisférico Superior(FHS), la altura de los edificios, presencia de árboles, contenido de aerosoles, reflectancia de las superficies, posibilidades de regulación en intensidad y la nubosidad son algunos de los otros factores que influyen en el brillo de cielo.

Los trabajos Aubé 2015⁷, Aubé 2016a⁸, Aubé 2016b⁹ y Sánchez de Miguel et al. 2017¹⁰ intentan reproducir la importancia de cada uno de estos factores de la manera más realista posible, sin embargo, en el momento actual aún no está disponible un programa informático capaz de incluir todos estos efectos de manera que sea posible comparar todas estas predicciones teóricas con casos reales. Por esta razón, sigue siendo imprescindible llevar a cabo mediciones, con el fin de verificar el impacto real de las conversiones de lámparas de sodio de alta presión a LEDs.

Observaciones de satélite

Para estudiar casos reales, se presentan los efectos de las conversiones de lámparas de sodio de alta presión a LEDs blancos de dos regiones que han realizado importantes cambios en su iluminación, como el área metropolitana de Madrid y Milán. En el área de

¹ http://darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/AMA_Report_2016_60.pdf

² <http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/AMA.pdf>

³ Sánchez de Miguel, A. (2004). Iluminación LED. Un arma de doble filo. *Tribuna de Astronomía: Revista de astronomía, astrofísica y ciencias del espacio*, (55), 70-71.

⁴ Bierman, A. (2012). Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow?. *Lighting Research & Technology*, 44(4), 449-458.

⁵ Aubé, M., Roby, J., & Kocifaj, M. (2013). Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PloS one*, 8(7), e67798.

⁶ Luginbuhl, C. B., Boley, P. A., & Davis, D. R. (2014). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 21-26.

⁷ Aubé, M. (2015). Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 370(1667), 20140117.

⁸ Aubé, M. (2016). The LED outdoor lighting revolution: Opportunities, threats and mitigation for urban and rural citizens.

⁹ Aubé, M., Kocifaj, M., Zamorano, J., Lamphar, H. S., & de Miguel, A. S. (2016). The spectral amplification effect of clouds to the night sky radiance in Madrid. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, 11-23.

¹⁰ Sánchez de Miguel, A., Zamorano, M. A. J., Kocifaj, M., Roby, J., & Tapia, C. (2017). Sky Quality Meter measurements in a colour changing world. *arXiv preprint arXiv:1701.05019*.

Madrid se han realizado en los últimos años varias conversiones de sodio de alta presión a LEDs, como son las de Rivas Vaciamadrid, Velilla de San Antonio o el propio municipio de Madrid capital. En el área de Milán, fue, el municipio de Milán quien realizó la conversión. El caso de Madrid capital se realizó un cambio de entre el 33% y el 40% de las luminarias a LEDs blancos de 3000 k de temperatura de color, el cual dispone adicionalmente de un sistema de reducción de intensidad en tres fases, pasando de 100%, al 80% y 60% de intensidad. En principio, la conversión se realizó usando luminarias con un FHS ~ 0%, sin embargo, posteriormente se han instalado en muchas de las luminarias, difusores lambertianos que pueden haber aumentado el FHS hasta el 25%. Principalmente se remplazaron puntos de luz de baja altura. En el caso de Rivas Vaciamadrid, la conversión se realizó de sodio de alta presión a LEDs de 4000 k con FHS ~0%, como en el caso de Milán, ambos, sin regulación en intensidad, al menos apreciable en las imágenes estudiadas.

Para comprobar el impacto de estas conversiones está a punto de usar las imágenes desde la Estación Espacial Internacional (ISS), dado que las observaciones de otros satélites como el Suomi-NPP, con su cámara VIIRS es ciega a las emisiones en el azul, que son las más importantes para la medida del impacto ambiental. Las imágenes de ISS son tomadas de manera manual por los astronautas con las cámaras réflex convencionales. Dichas imágenes deben estar corregidas de diferentes maneras para el poder ser utilizadas de la manera científica, corregir los efectos de viñeteo del objetivo, efectos de la linealidad del sensor, la proporcionalidad del ajuste de la toma, etc. La calibración absoluta en intensidad se ha realizado mediante el Método de acción puntual lejana utilizando estrellas medidas desde la ISS para evitar posibles efectos de absorción de las ventanas de la ISS. Todo el proceso de reducción se detalló en Sánchez de Miguel 2015¹¹. No están tenidos en cuenta los efectos de la extinción atmosférica. Dado que las imágenes son de la ISS solo se han detectado los canales RGB, fue útil utilizar técnicas de fotometría sintética (más detalles en Sánchez de Miguel 2015 y Sánchez de Miguel y otros 2017) Fuentes de iluminación. Índice de Supresión de Melatonina (MSI) y Índice de Visibilidad Estelar (SLI) Ambos de Aubé et al. Alabama. 2013. Podemos ver en la figura 1 y 2, como ambos índices se ajustan con el cociente de los canales G (Verde) y R (Rojo) de las cámaras Nikon. Además de estos, hemos utilizado también la relación entre estos dos canales para estimar la intensidad fotográfica $V(\lambda)$ y el canal G.

¹¹ de Miguel, A. S. (2015). *Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes: Metodología y resultados* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid).

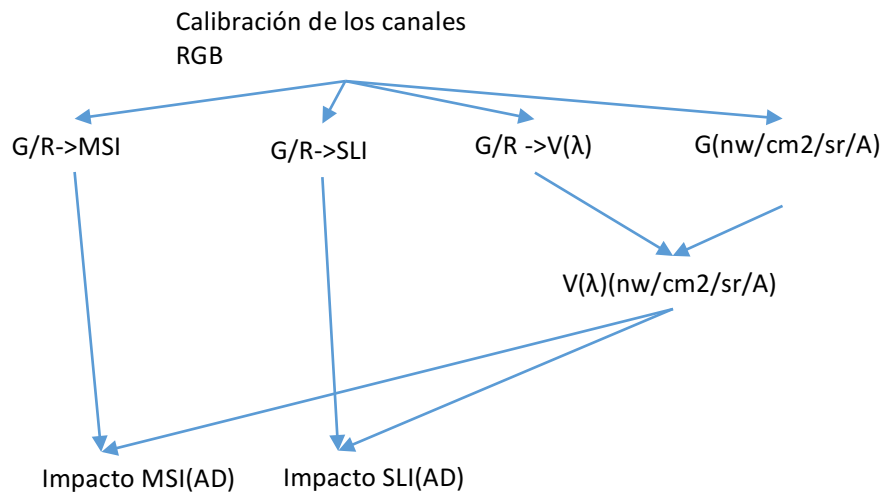


Ilustración 1 Esquema para la obtención del impacto MSI e SLI a partir de las imágenes de cámara Reflex digital.

Usando la imagen calibrada de manera absoluta en el canal G y la relación entre la fotometría sintética G/R con los índices MSI, SLI y la curva fotopica, podemos usar el cociente entre las imágenes G/R para obtener una estimación del MSI, SLI y conversión del canal G frente a la curva fotopica. A continuación, podemos obtener una imagen calibrada en la banda fotopica aplicando la corrección G/R vs $V(\lambda)/G$ tan solo multiplicando el mapa G/R por la corrección, y esta por la imagen del canal G absolutamente calibrado. El mismo procedimiento podemos seguir para los índices MSI e SLI y obtenemos el mapa de impacto en cada uno de los índices.

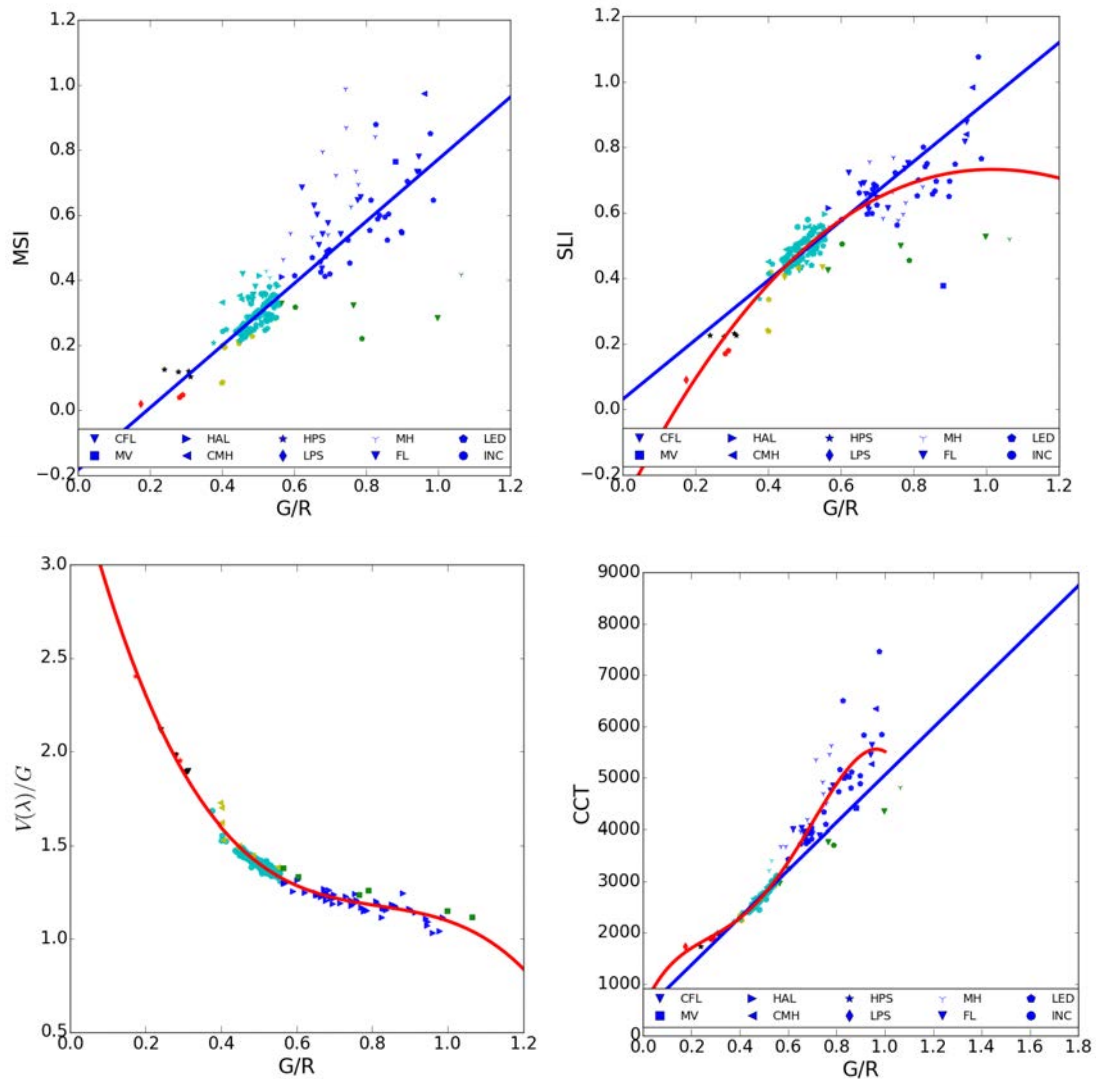


Ilustración 2 Relaciones G/R con los índices MSI, SLI y el cociente $V(\lambda)/G$ con el cociente G/R. las líneas azules marcan los mejores ajustes lineales y en rojo el mejor ajuste polinomial. Para facilitar la interpretación de las figuras anteriores, hemos añadido también la relación entre el cociente G/R con la temperatura de color.

En la ilustración 2 podemos ver los ajustes a la fotometría sintética realizados a los espectros usados en Sánchez de Miguel et. al. 2017, LSPDD y Tapia Ayuga et. al. 2017¹². Si bien existe una dispersión notable de los diferentes espectros, claramente es mejor utilizar esta información que simplemente suponer que por ejemplo un LED de 3000 k, que tiene un cociente G/R ~0.5, que implica un MSI ~0.3, frente a sodio de alta presión que tiene típicamente G/R~0.3, que implica un MSI ~0.17, por tanto, suponer que ambas fuentes de luz contaminan de la misma manera supone un error de un 100%.

Una vez que disponemos de las imágenes correspondientes a los Impactos MSI e Impactos SLI, podemos analizar sobre las imágenes si las zonas estudiadas han aumentado su impacto o no.

Milán:

¹² Tapia Ayuga, C., Sánchez de Miguel, A., & Zamorano Calvo, J. (2017). LICA-UCM lamps spectral database.



Ilustración 3 Imágenes de la ISS corregidas para representar la intensidad en la banda fotópica. A la izquierda, Milán en 2012. A la derecha, Milán en 2015. Se observa que apenas hay variación en la luminancia. Las medidas indican que la variación fue de un $0\% \pm 5\%$.

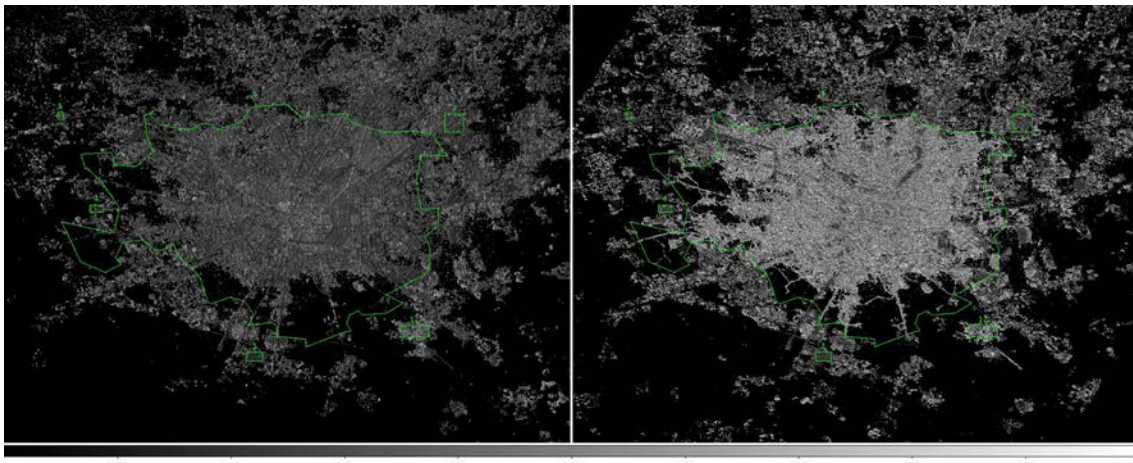


Ilustración 4 Estimación del Índice MSI para las fuentes luminosas de la ciudad de Milán en 2012(izquierda) y 2015(derecha). Se observa un aumento del índice MSI de un 37%.



Ilustración 5 Impacto MSI de la ciudad de Milán en 2012 (izquierda) y 2015(derecha). El aumento de impacto medido es de un 23%. El aumento es menor que el cambio en el índice MSI debido a que la iluminación ornamental de la ciudad no cambió de espectro y tiene un peso notable en la contaminación de la ciudad. Haciendo que el impacto de los cambios de iluminación en las calles sea menor notable.

En las figuras 3, 4 y 5, se observa cómo se llega a la estimación basada en las imágenes de cuál es el incremento del impacto en la supresión de melatonina de la ciudad de Milán. Siendo este de un aumento neto de al menos un 23%. Hay que tener en cuenta que esta estimación debe considerarse como una cota inferior, ya que, por ejemplo, no se ha tenido en cuenta la absorción atmosférica, lo que tiende a enrojecer la información. El mismo procedimiento ha sido seguido para el índice de visibilidad estelar, indicando que se la ciudad es en 2012 un 18% más contaminante por unidad de área que en 2015 y en términos absolutos, debido a que como se comenta en el caso anterior, la iluminación ornamental no cambió de espectro, el incremento de contaminación lumínica fue de un 8%. Este parámetro no tiene en cuenta de dispersión atmosférica, si esta se tiene en cuenta, la contaminación aumenta a un 37%.

Madrid

La ciudad de Madrid cambió entre un 33% y un 40% de su iluminación a LEDs de 3000k en 2014. Según los modelos, deberíamos de observar un incremento de la contaminación lumínica de aproximadamente un 15%, considerando que solo se sustituyeron las luminarias de menor potencia. Lo que se observa en las imágenes de la ISS es que se observa un aumento del SLI medio de la ciudad de Madrid de un 20% y en el índice MSI de un 33%. Sin embargo, para el caso de Madrid no disponemos de imágenes de la misma hora que la imagen de referencia de 2012, por lo que este valor está contaminado por la iluminación ornamental. Gracias a la regulación en intensidad, podemos ver que algunas de las imágenes parece que la luminancia de la ciudad de Madrid es ligeramente menor, una bajada de entre el 0% y el 10%. Sin embargo, los mayores índices de SLI e MSI hacen que el impacto total medido es entre el 0 % y el 20% mayor en el índice SLI. Este valor es compatible con el no incremento de contaminación sin considerar la difusión atmosférica. Cuando se considera la difusión atmosférica, el impacto medido pasa al rango 7-29% de incremento.

En principio podemos descartar que la contaminación lumínica de Madrid haya disminuido, para verificar si ha aumentado, necesitamos obtener imágenes sin iluminación ornamental.

Rivas-Vaciamadrid

El municipio de Rivas Vaciamadrid realizó una sustitución de su alumbrado público en el año 2013, prácticamente total a LEDs de 4000k. El cambio en el índice SLI medio ha sido de 30-80% y en el índice MSI, el impacto SLI ha crecido entre un 24-42% y MSI de 51-80%.

Parla

El municipio de Parla cambió su alumbrado público a 3000K en 2014 y esto afectó a SLI medio aumentando en un 29% y su MSL en un 50%. El impacto SLI sin embargo, disminuyó en un 20% sin considerar la difusión atmosférica debido a la bajada en un 30% el nivel de iluminación. Sin embargo, cuando se considera el efecto de la difusión atmosférica, la disminución del impacto SLI que en un 0%. El impacto MSI creció entre un 5-10%.

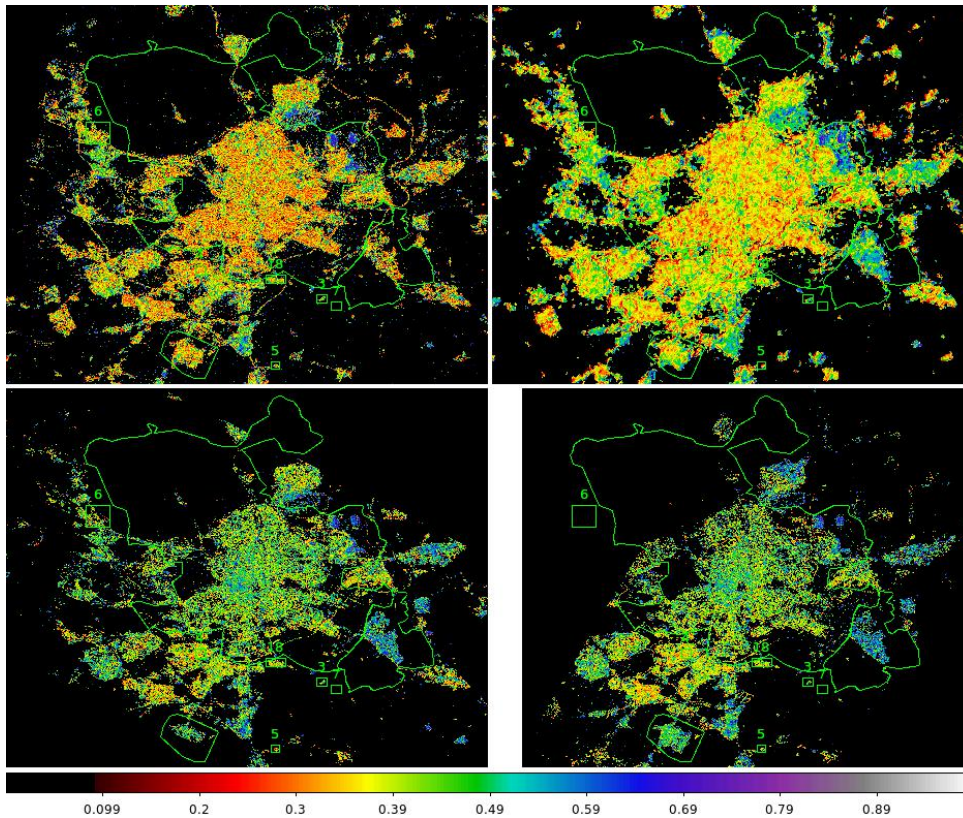


Ilustración 6 Estimación del Índice SLI para las fuentes luminosas de la ciudad de Madrid en 2012 (arriba izquierda), 2014(arriba derecha),2015(abajo izquierda) y 2017(abajo derecha).Se observa un amento del índice SLI de manera generalizada con el tiempo, salvo en los municipios que no han cambiado su iluminación.

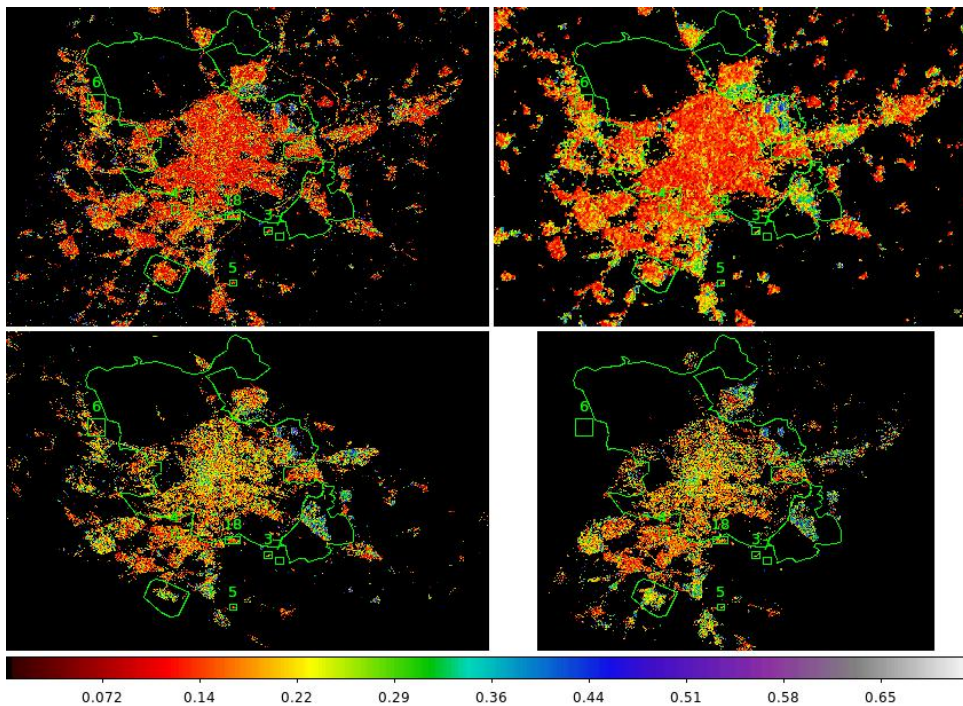


Ilustración 7 Estimación del Índice MSI para las fuentes luminosas de la ciudad de Madrid en 2012 (arriba izquierda), 2014(arriba derecha),2015(abajo izquierda) y 2017(abajo derecha).Se observa un amento del índice SLI de manera generalizada con el tiempo, salvo en los municipios que no han cambiado su iluminación.

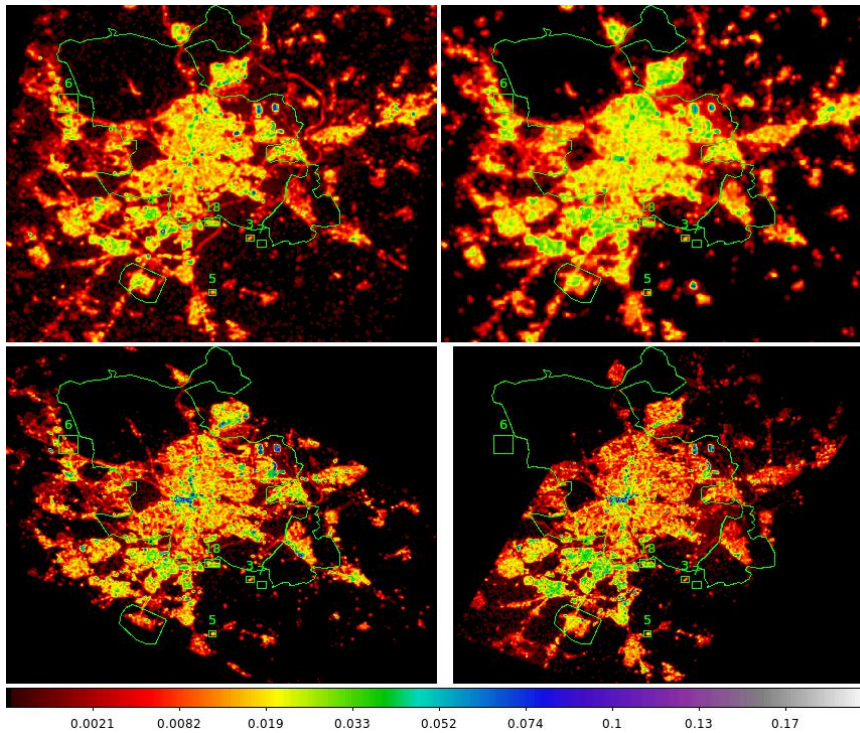


Ilustración 8 Estimación del Impacto SLI para las fuentes luminosas de la ciudad de Madrid en 2012 (arriba izquierda), 2014(arriba derecha),2015(abajo izquierda) y 2017(abajo derecha).Se observa un amento del índice SLI de manera generalizada con el tiempo, salvo en los municipios que no han cambiado su iluminación.

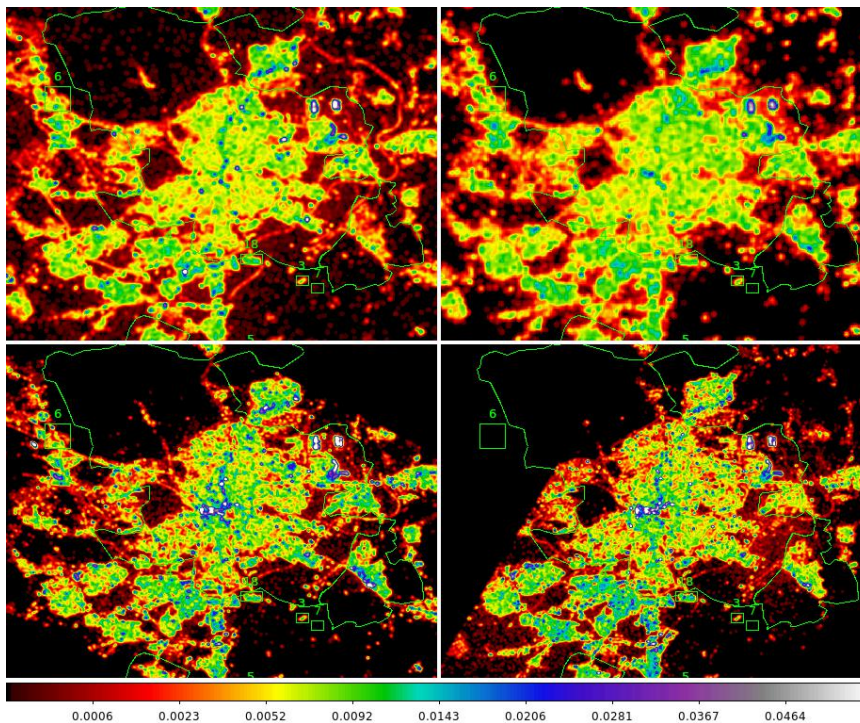


Ilustración 9 Estimación del impacto MSI para las fuentes luminosas de la ciudad de Madrid en 2012 (arriba izquierda), 2014(arriba derecha),2015(abajo izquierda) y 2017(abajo derecha).Se observa un amento del índice SLI de manera generalizada con el tiempo, salvo en los municipios que no han cambiado su iluminación.

Nuevo modelo 3D

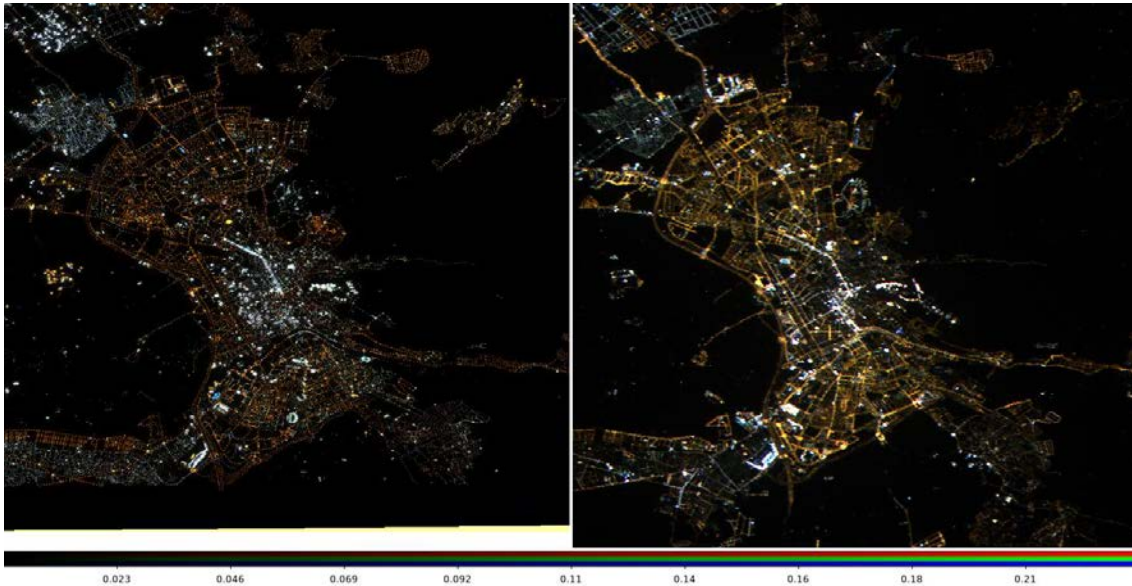


Ilustración 10 Modelo de la ciudad de Granada (izquierda), imagen de la Estación Espacial Internacional de la ciudad de Granada (derecha).

Como una herramienta para predecir y evaluar el potencial impacto ambiental de las sustituciones de alumbrado público, esta en proceso de evaluación un software para la modelización 3D y en color del alumbrado público a escala de una ciudad.

Discusión y conclusiones:

Por el momento, todos los modelos indican que el uso del LEDs de 3000 K y 4000 K son intrínsecamente más contaminantes. Sin embargo, en determinadas circunstancias, es posible que la reducción de intensidad, Flujo Hemisférico Superior y otros parámetros relevantes, puedan ayudar a minimizar en casos reales el que su espectro sea más contaminante. El análisis de los casos reales de Milán y Rivas Vaciamadrid indica que los cambios de sodio a LEDs de 4000k produce un amento claro de la contaminación lumínica. En el caso de Parla y la ciudad de Madrid, indica que se produce un amento más leve o nulo en el caso de Parla para el índice SLI, pero en ambos casos se produce un aumento del índice MSI.

Por otro lado, en ninguno de los casos anteriores se produjo una reducción significativa del nivel de iluminación, ya que en ninguno de los casos se llegó a una reducción de la luminancia mayor del 70%. El caso de Deltebre y Ruimar¹³, municipios en las que se desciende el nivel de iluminación hasta el 50%, indica que tales reducciones son posibles. Queda por explorar ese escenario, sin embargo, queda claro que es verdaderamente complicado reducir la contaminación lumínica en áreas en las que los edificios actúan como obstáculo usando LEDs de 4000 k y 3000 k. Recomendamos que no se cite la reducción de la contaminación lumínica como argumento para dichas conversiones, dado que los modelos y los casos estudiados indican que no hay casos probados de reducción de la misma por dicho método. Para temperaturas de color de 2400 k a 2700 k, no hay aun lugares donde puedan ponerse a prueba los modelos con

¹³ Estrada-García, R., García-Gil, M., Acosta, L., Bará, S., Sanchez-de-Miguel, A., & Zamorano, J. (2016). Statistical modelling and satellite monitoring of upward light from public lighting. *Lighting Research & Technology*, 48(7), 810-822.

las observaciones. Para temperaturas de color inferiores a 2400 k, entramos en una temperatura de color similar a las lamparas incandescentes y lamparas de sodio, por lo que probablemente sea mucho más sencillo alcanzar reducciones de FHS e nivel de iluminación que realmente reduzcan la contaminación lumínica.

Una cosa a destacar es que los modelos tienden a predecir impactos mucho mayores que los observados. En la actualidad no podemos concluir que los modelos son incorrectos ya que hay demasiados factores involucrados en el proceso de contaminación lumínica, por lo que necesitamos modelos más cercanos a casos reales como la versión preliminar presentada en este trabajo. Además, también necesitamos mejores medidas para poder estudiar los casos con mayor precisión y con diferentes soluciones técnicas.