

Experimentos de brillo de cielo nocturno en Añora para determinar el impacto del control del alumbrado público

Informe que se presenta al Exmo. Ayuntamiento de Añora (Córdoba)

Contiene un análisis de la evolución del brillo del cielo nocturno en Añora a partir de los datos de los fotómetros STARS4ALL TESS-W stars9 y stars793.

Realizado por
Jaime Zamorano^{1,2}, Manuel Barco³, Cristóbal García⁴,
Antonio Luis Caballero⁵ and Salvador Bará⁶

1 Depto. Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense, Madrid,

2 Instituto de Física de Partículas y del Cosmos (IPARCOS), UCM, Madrid

3 Agrupación Astronómica de Córdoba

4 Asociación Astronómica AstroHenares

5 Ayuntamiento de Añora (Córdoba)

6 Agrupación Astronómica "Ío", 15005 A Coruña, Galicia

e-mail: jzamorano@fis.ucm.es

Versión 2. 2022/12/14

Resumen

La medida del brillo del cielo nocturno permite estimar la contaminación lumínica de un cierto lugar. Esta contaminación procede en una gran parte del propio entorno y también de las fuentes contaminantes de los alrededores y de otras a gran distancia si son muy brillantes. Con fotómetros en estaciones fijas se puede medir continuamente el brillo del cielo y por lo tanto estimar la evolución de la contaminación lumínica.

El brillo del cielo en Añora se ha estado midiendo desde agosto de 2016 por medio de un fotómetro TESS-W del proyecto europeo STARS4ALL. De esta manera tenemos más de un millón de datos acumulados en una serie temporal larga.

La colaboración ciudadana y la del Excmo. Ayuntamiento de Añora ha permitido además realizar experimentos que evalúan el impacto del alumbrado público de Añora en su brillo del cielo. Este estudio se presentó en el congreso internacional ALAN2022 que reúne a los investigadores de todo el mundo en el campo de la contaminación lumínica (<http://www.artificiallightatnight.org/>) y se ha publicado en una revista internacional de impacto en esta área de conocimiento:

Jaime Zamorano, Salvador Bará, Manuel Barco, Cristóbal García, Antonio Luis Caballero *"Controlling the artificial radiance of the night sky: The Añora urban laboratory"*

Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer Volume 296, February 2023, 108454 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108454>

Pretendemos profundizar en este estudio científico con experimentos complementarios en los sucesivos meses para los que esperamos disponer de esta fructífera colaboración con las autoridades municipales.

1. Evolución del brillo del cielo nocturno en Añora

1.1 Introducción

El fotómetro stars9 es uno de los primeros fotómetros de medida del brillo del cielo nocturno desarrollados por Cristóbal García y que está midiendo en el domicilio de Manolo Barco en Añora desde 2016. Desde marzo de 2022 otro fotómetro stars793 está operativo en el domicilio de Antonio Luis Caballero. Estos fotómetros se diseñaron durante el proyecto europeo STARS4ALL para monitorizar la contaminación lumínica. Las medidas continuas desde una estación fija permiten determinar valores estadísticos y evolución a lo largo del tiempo.

Se muestran los resultados de un análisis rápido de las medidas en este documento para determinar si las actuaciones en el alumbrado público han producido el efecto deseado de mitigación de la contaminación lumínica.

1.2 Medidas disponibles

Desde agosto de 2016 hasta finales de junio de 2022 se han recogido 1192344 medidas del fotómetro stars9.

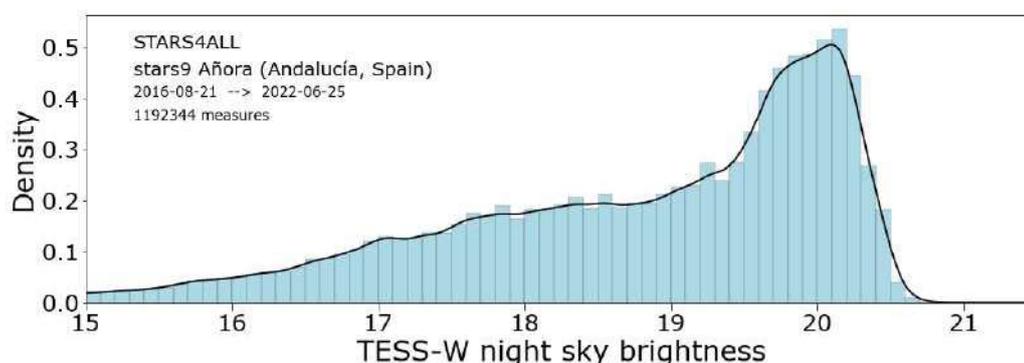


Figura 1. Histograma de medidas de brillo del cielo nocturno desde el inicio de las medidas.

La variable magnitud es logarítmica e inversa: la diferencia entre magnitud 19 y 20 magnitudes/arcsec² corresponde a un cielo que es 2.5 veces más brillante en 19. En el gráfico de la figura 1 los valores correspondientes a noches más oscuras aparecen a la derecha (valores más altos). Se observa una joroba alrededor de magnitud 20 indica el valor más repetido (la moda) de las medidas. Estos valores se obtienen en noches despejadas y sin la Luna sobre el horizonte y sirven de referencia para estudiar la evolución de la contaminación lumínica. Los valores en la cola de la izquierda corresponden a medidas en noches con Luna o con nubes. Las nubes aumentan el brillo ya que reflejan la luz que las ilumina desde tierra.

En un primer intento de observar si ha habido evolución podemos dividir las medidas en aquellas anteriores a mayo de 2021 y las posteriores a esa fecha. Los histogramas se

muestran en la Figura 2 y en ellos se aprecia que el cielo puede estar oscureciéndose en épocas recientes en consonancia con las actuaciones en el alumbrado público.

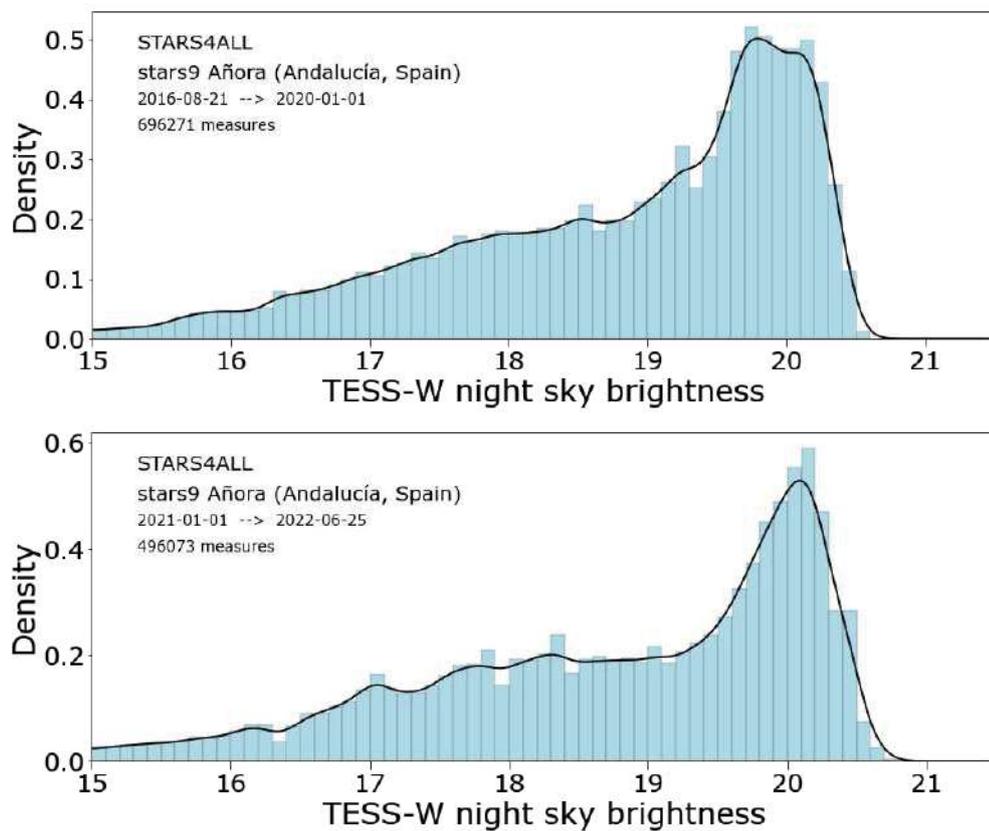


Figura 2. Histogramas para el período anterior a 2021 (arriba) y el correspondiente a las medidas desde esa fecha.

Aunque se aprecian diferencias entre ambos histogramas está claro que se necesita más detalle aumentando la resolución temporal de los histogramas. Este estudio se mostrará más adelante.

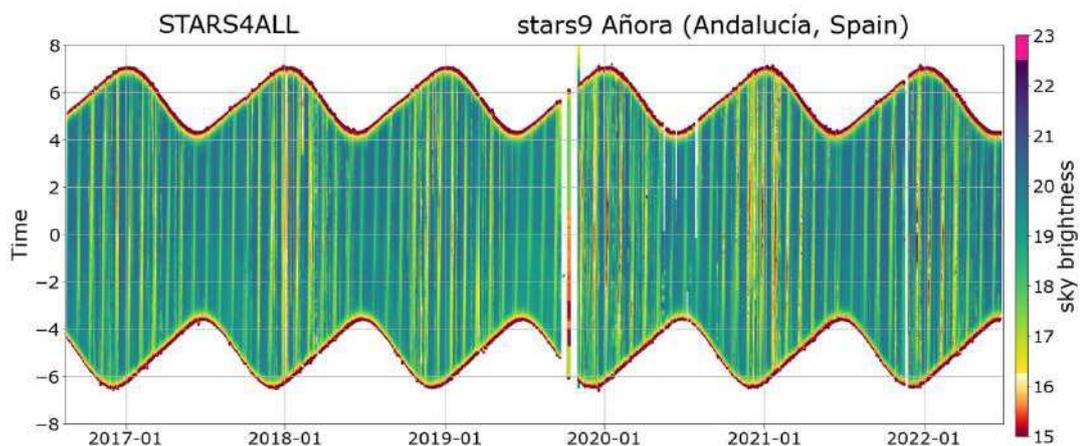


Figura 3. Evolución del brillo del cielo nocturno codificado en colores.

El gráfico de la Figura 3 muestra cómo varía el brillo del cielo nocturno a lo largo del tiempo (eje X). Cada medida se codifica en un color representado en la tabla de colores

de la derecha. Cada línea vertical corresponde a una noche de observación, y el eje Y está en horas respecto a medianoche. La forma sinusoide es debida a la menor duración de la noche alrededor del solsticio de verano (menor anchura en junio) y lo contrario alrededor del solsticio de invierno en diciembre. Las bandas amarillentas aparecen cada período lunar debido a la iluminación natural de la Luna.

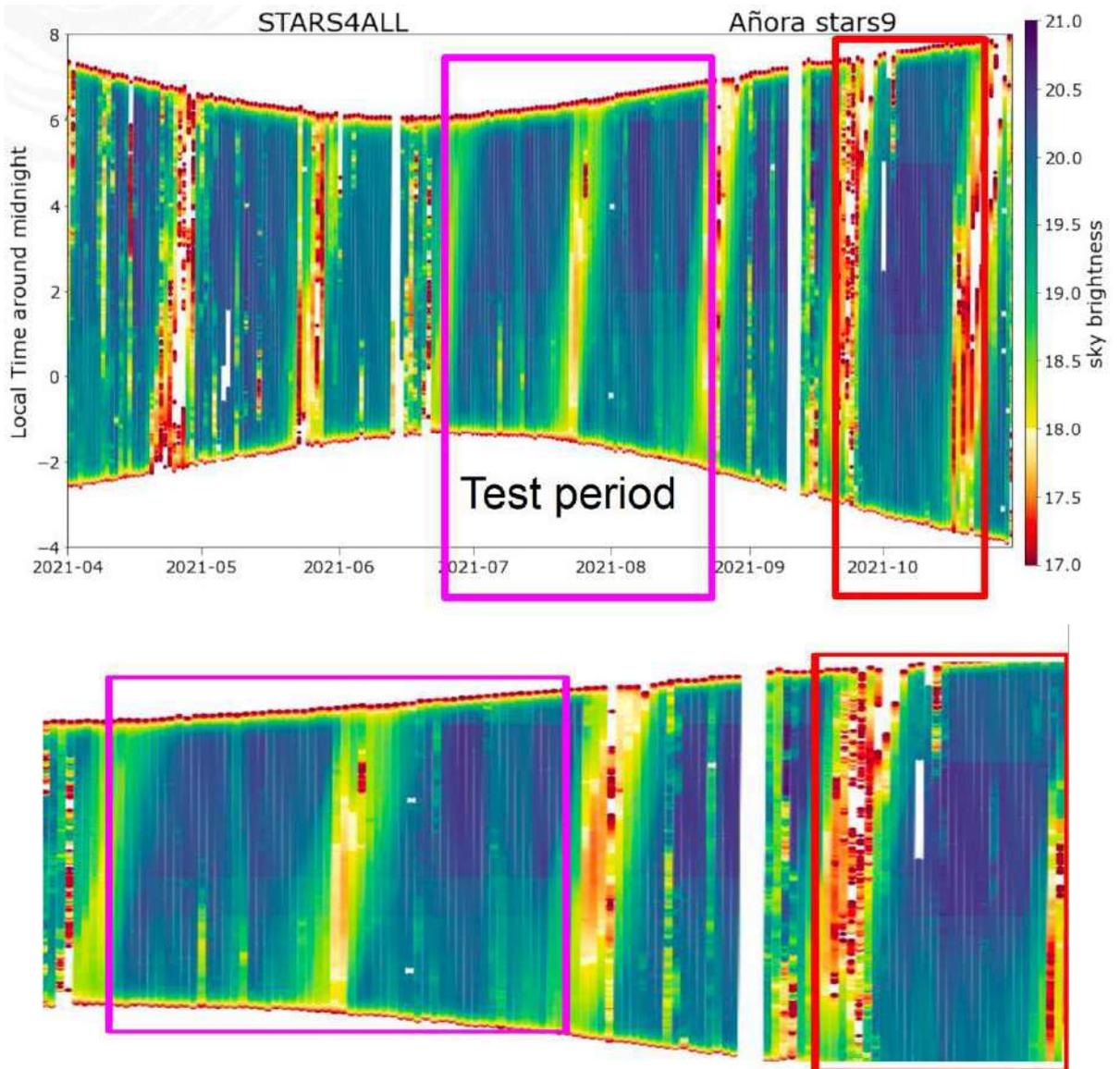


Figura 4. Detalle del gráfico de la Figura 3. Con mayor ampliación abajo para distinguir las bandas de color cambiando a determinadas horas de la noche.

En la ampliación del gráfico para las fechas del período de pruebas (Figura 4) se aprecian bandas de diferente color (diferente brillo de cielo) en horas de la noche. Estas variaciones bruscas y detectables corresponden al control de la potencia del alumbrado.

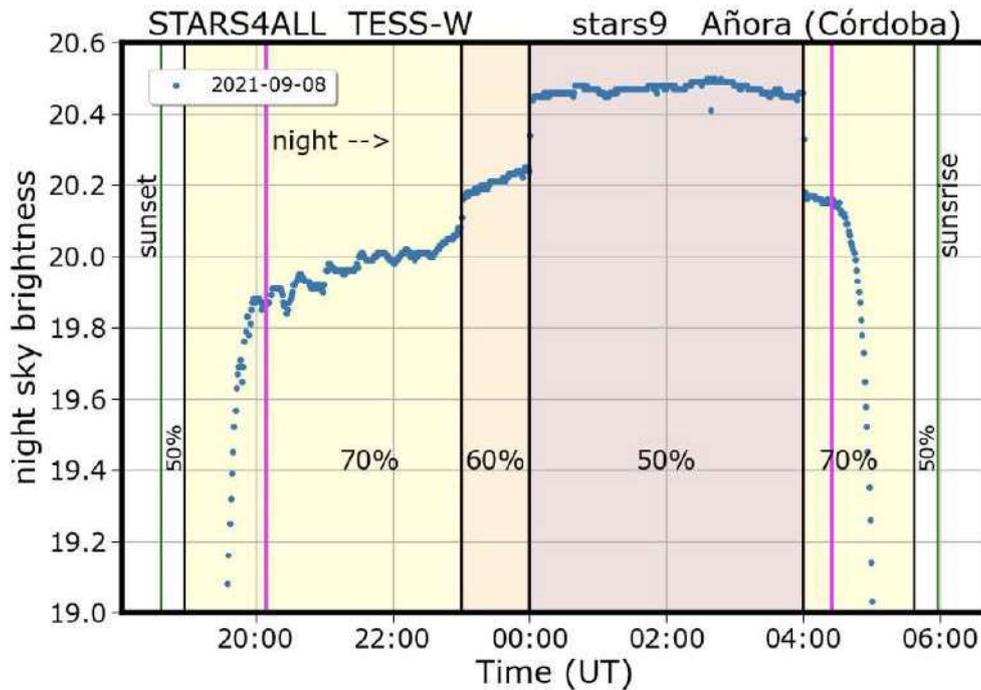


Figura 5. Gráfico de la evolución del brillo del cielo nocturno a lo largo de la noche del 8 de septiembre de 2021. Los números con porcentajes indican la potencia del alumbrado en las farolas que están bajo control y cuya potencia puede ser controlada a discreción.

Los cambios bruscos de brillo del cielo como resultado del cambio de potencia en las luminarias se aprecian también en la Figura 5 que muestra un ejemplo para una de las noches. En este caso la disminución desde el 60% de potencia al 50% se traduce en un cambio del brillo del cielo desde 20.2 a 20.5 magnitudes/arcsec² que equivale a un cielo un 30% más oscuro.

1.3 Análisis estadístico

Para apreciar la evolución debemos determinar el brillo típico del cielo agrupando las medidas por años o meses, por ejemplo.

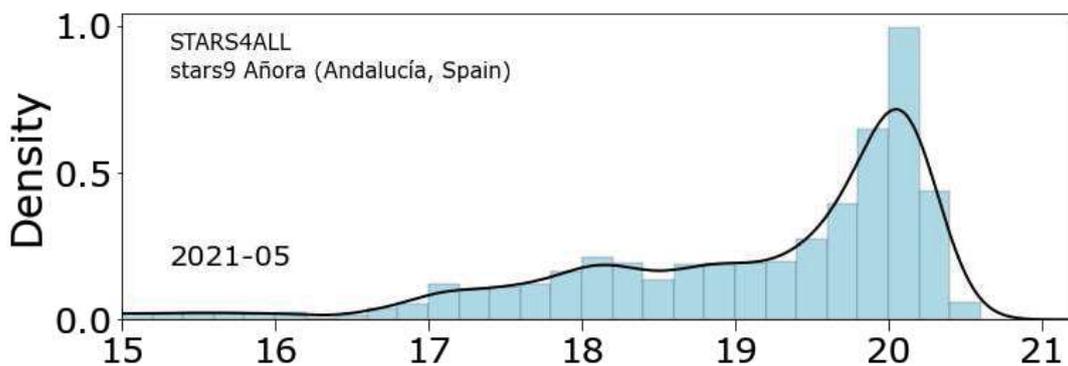


Figura 6. Histograma de medidas de brillo de cielo durante el mes de mayo de 2021. La línea negra corresponde al análisis KDE explicado en el texto.

Los histogramas pueden ser ajustados por una función KDE (de sus siglas en inglés, *Kernel Density Estimation*) que es una manera de estimar la función de densidad de

probabilidad de una variable. Es un método no paramétrico que se usa en problemas similares. Básicamente se intenta recuperar la forma real del histograma a partir de las observaciones. En el ejemplo de la Figura 6 para mayo de 2021 la función ajustada es suave y tiene un máximo alrededor de 20.1 aproximadamente.

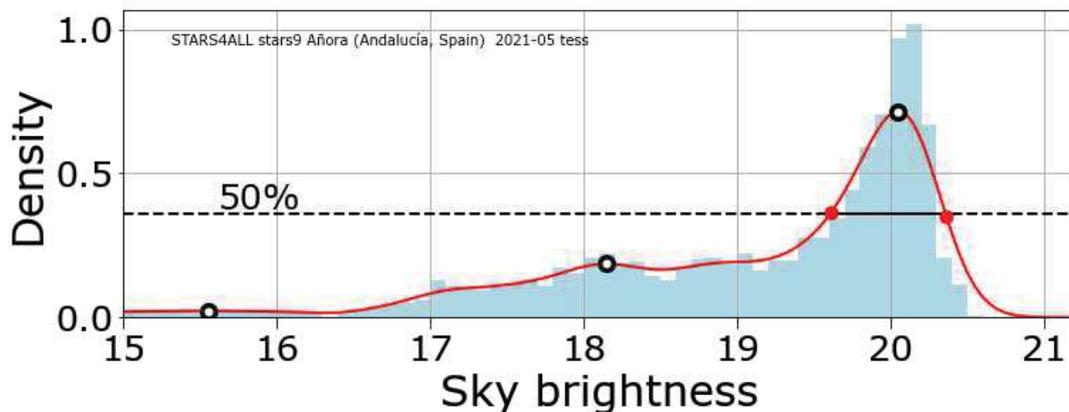


Figura 7. Como en la Figura 6 con una mayor resolución en el histograma y mostrando el valor donde esta el máximo de la función KDE.

En la Figura 7 se muestra el máximo del histograma o moda de los datos una vez ajustados y los valores de este pico para valores que son la mitad de esta densidad. Es una manera de estimar la anchura del pico.

Podemos realizar este ajuste para todos los meses de mayo desde que se dispone de datos en Añora. Es una forma de estudiar la evolución usando siempre las mismas fechas de forma que las variaciones estacionales no interfieran en este estudio.

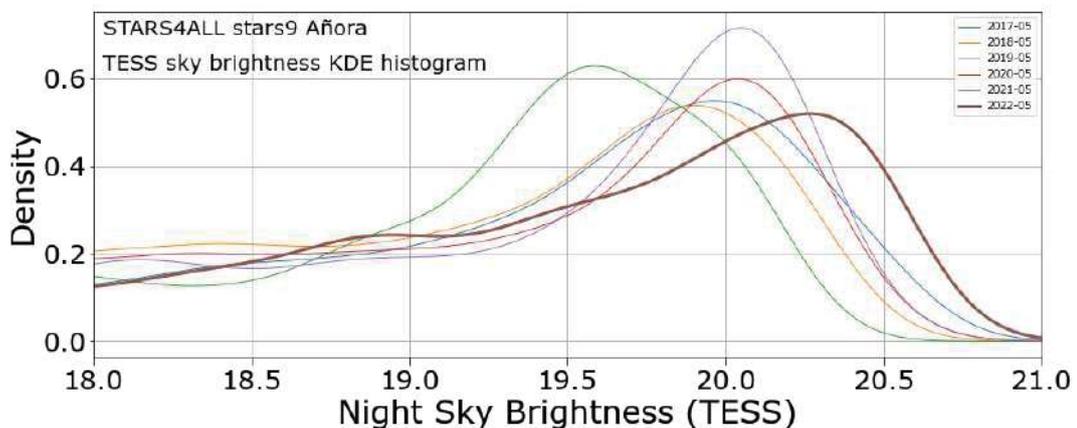


Figura 8. Ajustes KDE a los histogramas de medidas en el mes de mayo desde el año 2017. Se marca más grueso las últimas medidas de mayo de 2022.

El ajuste KDE del histograma de mayo de 2022 parece indicar que se desplaza hacia la derecha, es decir cielos más oscuros.

Si realizamos el mismo estudio con las medidas agrupadas por años se obtiene el gráfico de la Figura 9, donde también parece que el cielo de Añora se está oscureciendo gracias al control del alumbrado.

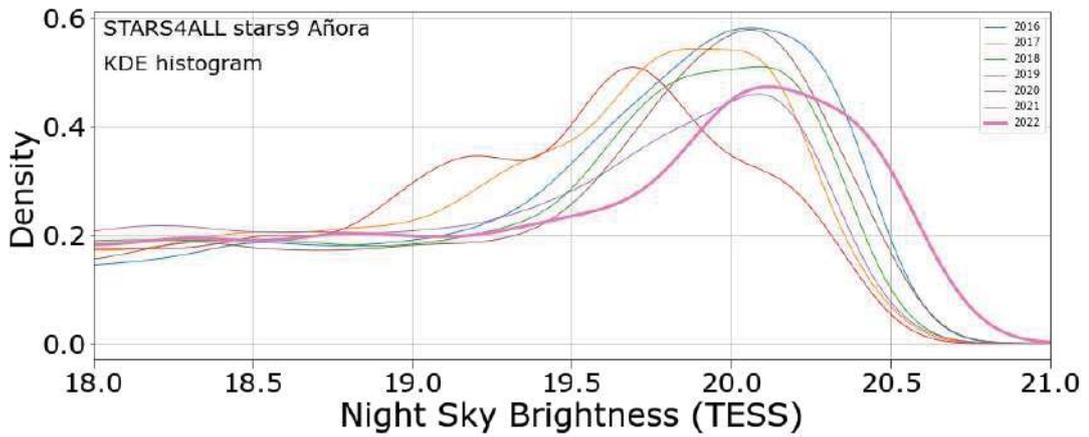


Figura 9. Ajustes KDE a los histogramas de medidas agrupadas por años.
Se marcan más grueso las últimas medidas de 2022.

La Figura 10 nos muestra la moda de las medidas mensuales a lo largo del tiempo. Es más difícil apreciar la evolución en este caso. Si realizamos el mismo estudio con las medidas agrupadas por años se obtiene el gráfico de la Figura 11.

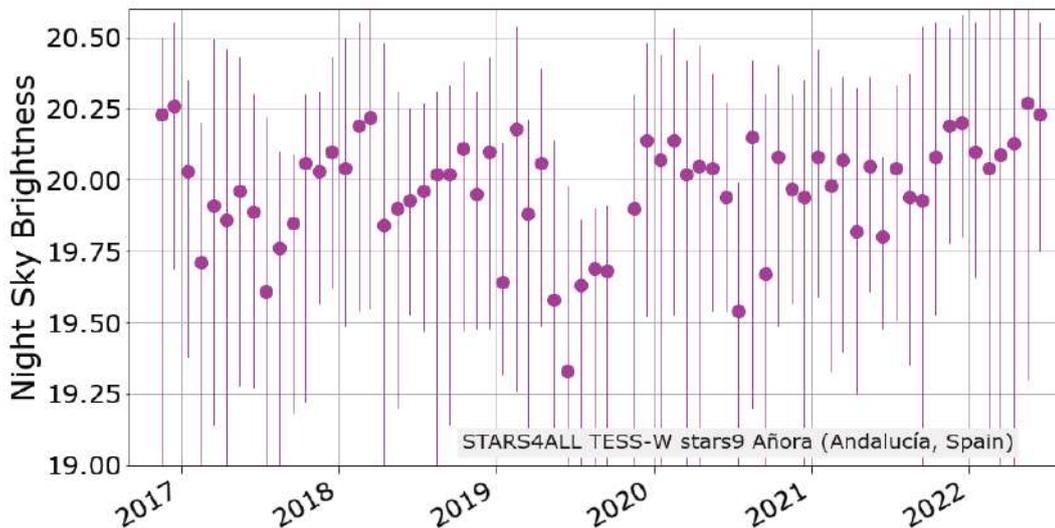


Figura 10. Evolución de la moda mensual tras los ajustes KDE.
Las barras representan los límites del 50%.

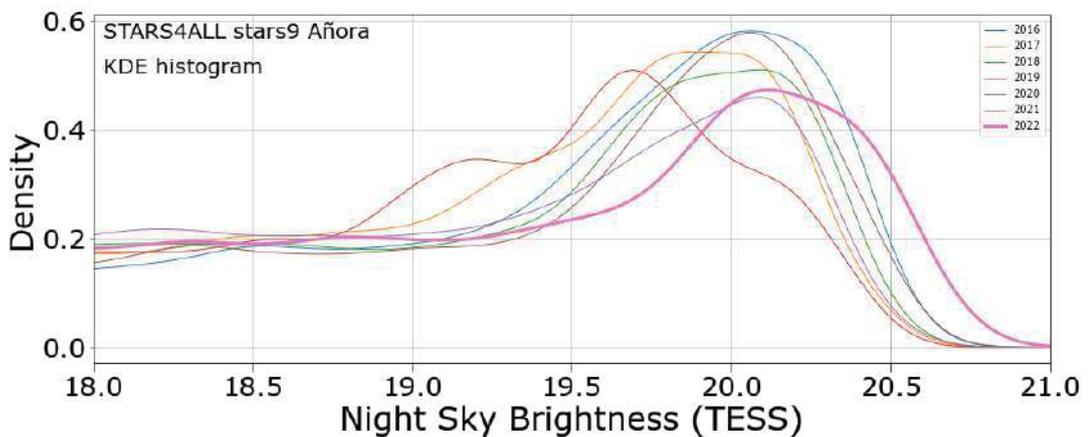


Figura 11. Ajustes KDE a los histogramas de medidas agrupadas por años.
Se marcan más grueso las últimas medidas de 2022.

Podemos observar cómo evoluciona por años en la figura 12 y con más detalle (histogramas) en la figura 13.

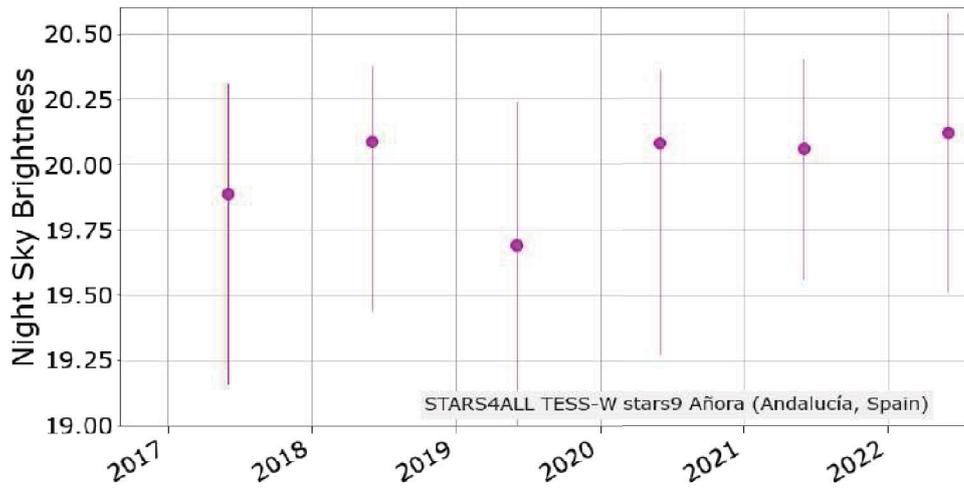


Figura 12. Evolución de la moda anual tras los ajustes KDE. Las barras representan los límites del 50%.

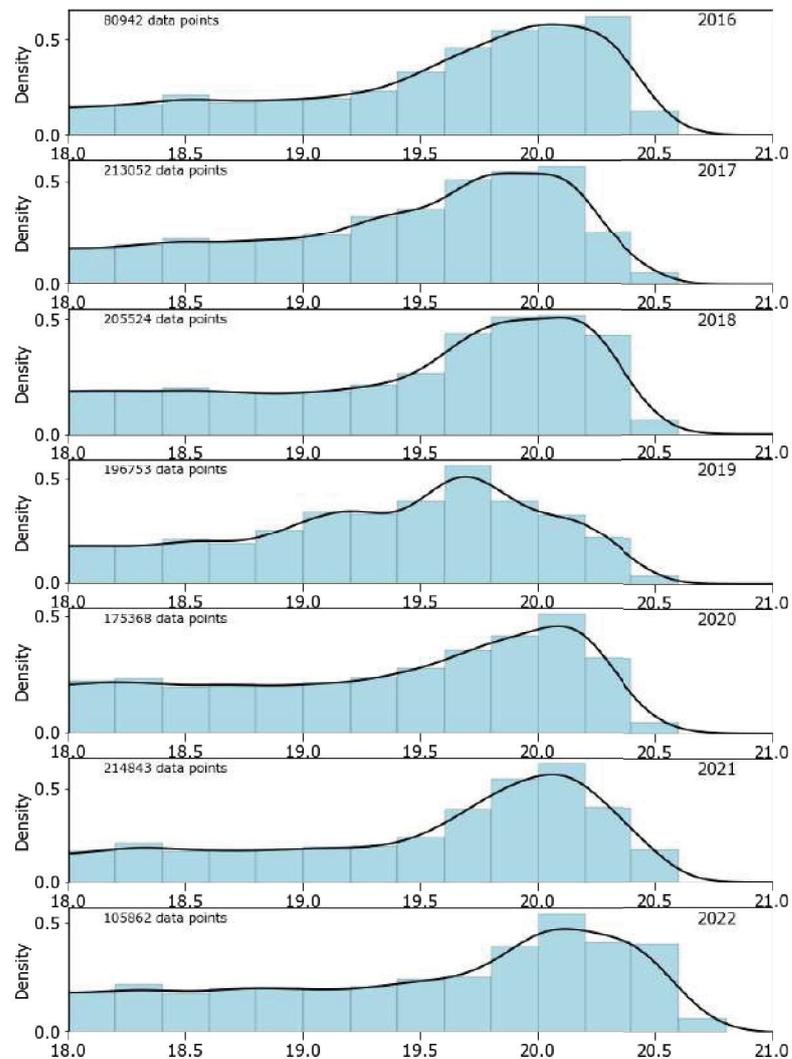


Figura 13. Histogramas para los diferentes años.

De las figuras 12 y 13 se desprende que el cielo de Añora se está oscureciendo gracias al control del alumbrado. En particular el último histograma (sólo el primer medio año de 2022) muestra más observaciones en el intervalo 20.2 a 20.6 magn/arcsec². Necesitamos repetir este estudio descartando las observaciones con luna sobre el horizonte y usando sólo datos de cielos despejados.

2. Test de alumbrado y brillo del cielo

2.1 El caso científico

La propagación de la contaminación lumínica es un tema de estudio ya que las políticas de mitigación de sus impactos deben basarse en los modelos que predicen cómo oscurecer el brillo del cielo regulando las fuentes contaminantes. Localidades de mediano tamaño como Añora sufren la contaminación que les llega de localidades cercanas y también de grandes urbes lejanas cuya contaminación es muy importante.

Los modelos predicen que la contribución de fuentes cercanas como las luminarias del alumbrado público de la población es importante. Se puede estimar el impacto de las farolas de la calle aprovechando situaciones en las que la iluminación cambia como por ejemplo en un apagón no previsto en el que los fotómetros continúan midiendo. Pero lo ideal es realizar un experimento sencillo para contrastar con los modelos.

2.2 El experimento de Añora

La colaboración con el Ayuntamiento de Añora ha permitido realizar tests en los que se varía a lo largo de la noche la potencia de las farolas reguladas a voluntad en valores seleccionados de antemano. El brillo del cielo se ha medido con dos fotómetros TESS-W situados dentro de la población (véase la Figura 13).



Figura 13. Mapa del alumbrado público de Añora y localización de las estaciones desde donde miden los fotómetros (marcado con una estrella). La codificación de colores indica los conjuntos de luminarias controladas por el mismo cuadro de mando.

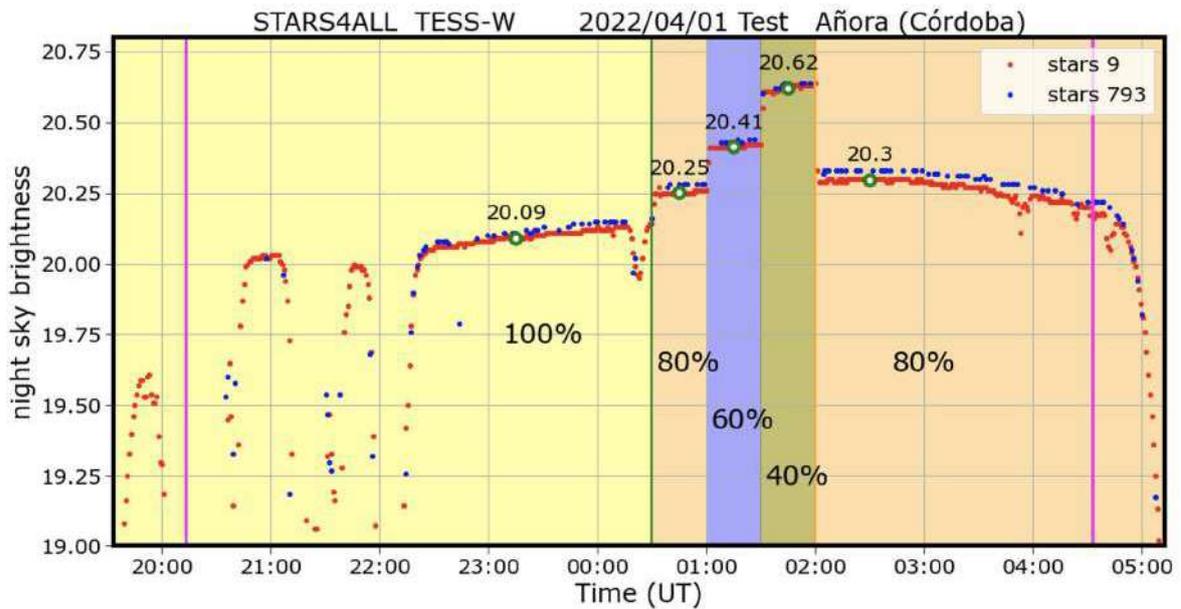


Figura 14. Variación a lo largo de la noche del brillo del cielo medido con los fotómetros stars9 y stars793.

En el test de la noche del 1 de abril de 2022 se utilizaron potencias entre el 100% (máximo posible) y el 40%. En la gráfica de la Figura 14 se etiquetan las potencias en cada intervalo y el valor medido del brillo del cielo. Con mejor detalle en la zona de interés se muestra en la Figura 15.

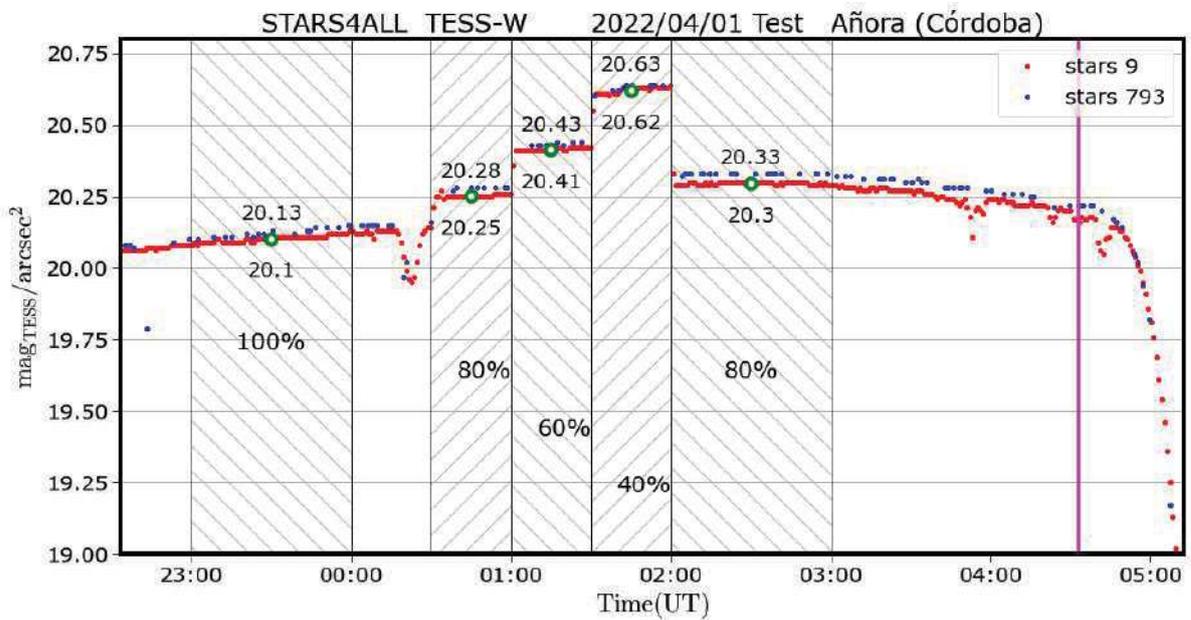


Figura 15. Como la Figura 14 pero con mejor detalle en las horas de interés. Se marca también la medida del fotómetro stars793.

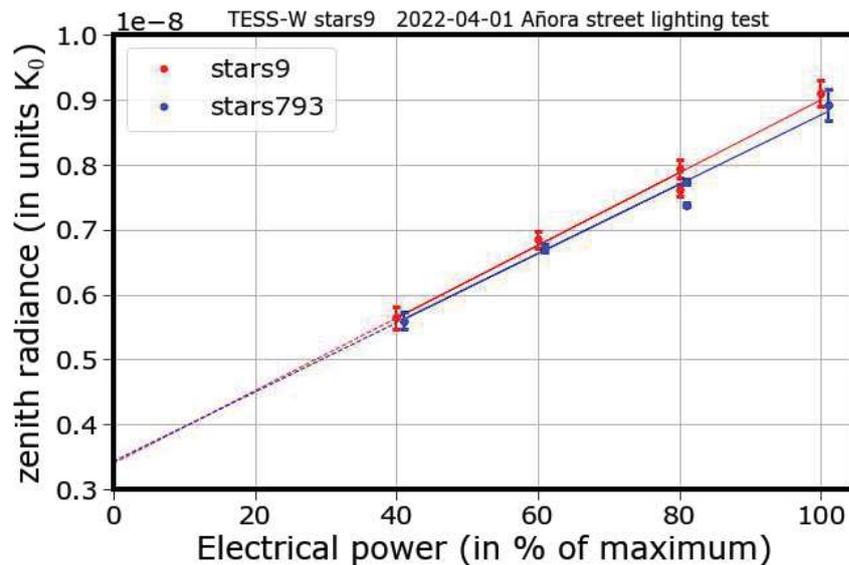


Figura 16. Ajuste de las medidas de brillo del cielo respecto a la potencia del alumbrado público.

Este experimento tiene gran interés científico ya que permite estimar la contribución del alumbrado público de Añora (las luminarias que se pueden controlar) en el brillo del cielo en el cénit de Añora. Ajustando los resultados de la relación entre brillo del cielo medido y potencia en ese momento (véase la Figura 16) se determina el valor del brillo del cielo que tendría Añora si se apagaran todas esas luces para ver un mejor cielo.

En este caso obtenemos un brillo de cielo estimado para apagado de estas farolas de $21.19 \text{ magn/arcsec}^2$. La contribución de estas farolas controladas al brillo del cielo en Añora es del 63%. Este resultado es de extraordinaria importancia ya que, mediante modelado, permitirá estimar los efectos a corta distancia de las luminarias en la medida del brillo del cielo.

El experimento y su análisis se han publicado como resultado científico.



Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer

Volume 296, February 2023, 108454



Controlling the artificial radiance of the night sky: The Añora urban laboratory

Jaime Zamorano ^{a, b}, Salvador Bará ^c, Manuel Barco ^d, Cristóbal García ^e, Antonio Luis Caballero ^f

2.3 Próximos experimentos

Actualmente se ha instalado un tercer fotómetro en Parque de San Martín. Este lugar tiene un cielo nocturno menos contaminado y permite tener una referencia de cielo más oscuro. Las medidas de estos fotómetros se puede ver en tiempo real (datos en abierto, open data) en el siguiente enlace,

<https://tess.dashboards.stars4all.eu/d/mgzFq9WWu/anora?orgId=1&from=now-7d&to=now>

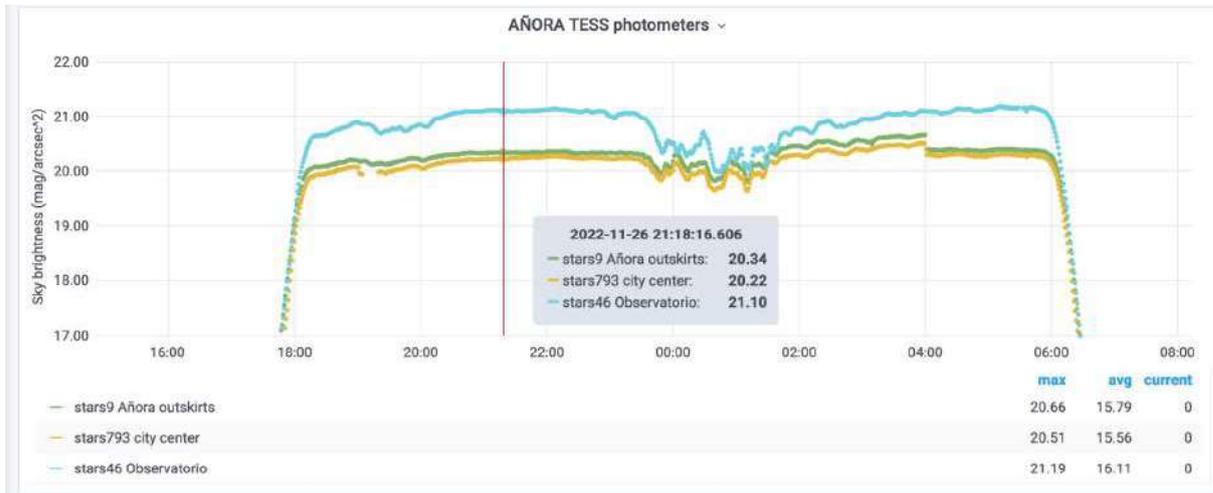


Figura 17. Ejemplo de medidas del brillo del cielo en tres fotómetros de la red de Añora.

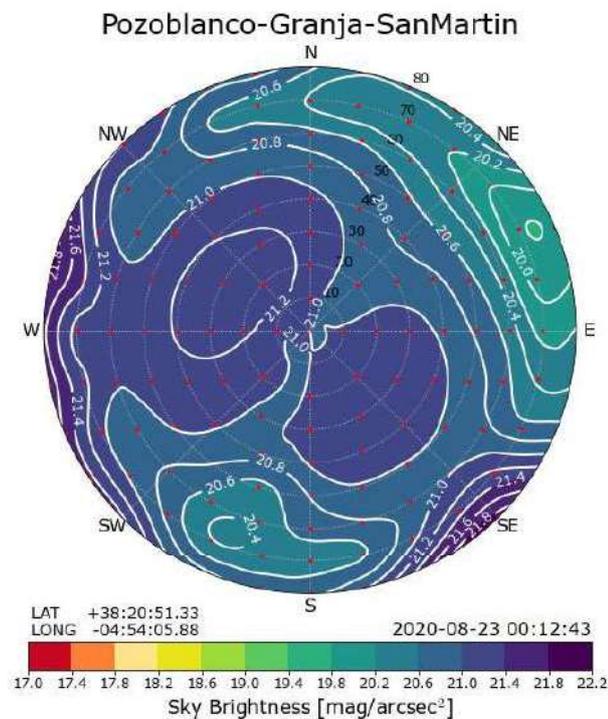


Figura 18. Mapa de todo el cielo obtenido en Granja San Martín a 2 km de Parque de San Martín. Muestra el brillo del cielo nocturno en todas las direcciones de la bóveda celeste

El mapa de todo el cielo (all-sky) obtenido con el fotómetro TAS en las proximidades de Añora es muy ilustrativo ya que muestra que el brillo de cielo en el cénit (Figura 18, centro del gráfico) es de 21.0 con regiones a ambos lados de 21.2 magn/arcsec². En el momento de esta medida la Vía Láctea estaba situada justo en el cénit que se muestra por ello ligeramente más brillante.

Pretendemos ampliar la red de fotómetros dentro y en los alrededores de Añora para convertirlo en un laboratorio urbano donde realizar experimentos científicos de relevancia en el campo de la contaminación lumínica.

¡Qué bonito sería que en una fiesta de verano se apagaran estas luminarias controladas para permitir a los ciudadanos disfrutar de la contemplación de la Vía Láctea desde las calles y plazas de Añora!

Se anexan a este informe las contribuciones publicadas sobre este primer experimento en la revista científica Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer

Jaime Zamorano, Salvador Bará, Manuel Barco, Cristóbal García, Antonio Luis Caballero
"Controlling the artificial radiance of the night sky: The Añora urban laboratory"
Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer Volume 296, February 2023,
108454 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108454>

También se ha publicado un artículo en la revista de divulgación astronómica Astronomía.

Jaime Zamorano ["El laboratorio de Añora: un ejemplo de colaboración ciudadana en la lucha contra la contaminación lumínica"](#) Astronomía, n.º 280, pp. 20-21 (octubre 2022)