

## CONCLUSIONES DE LA MODELIZACIÓN 3D EN LA SIERRA DEL MONTSEC, PIC DU MIDI DE BIGORRE Y LARRA, NAVARRA

Informe realizado por *Fernando Jáuregui*<sup>1</sup> en base a los trabajos científicos de: *Héctor Linares*<sup>2,3</sup>, *Eduard Masana*<sup>2</sup> y *Salvador J. Ribas*<sup>3,2</sup>

1. Planetario de Pamplona – NICDO.
2. Institut de Ciències del Cosmos (ICC-UB-IEEC), Barcelona.
3. Parc Astronòmic del Montsec – FGC, Àger. Lleida.

La modelización 3D se ha realizado usando el modelo numérico Illumina conjuntamente con medidas de la Sky Quality Camera (SQC) y de otros fotómetros como ASTMOM, TESS-W, TAS y SQM para validar y comprobar los datos. Se ha encontrado una satisfactoria correlación entre los diferentes sistemas de medida y la modelización con diferencias por debajo de 0,2 mag/arcsec<sup>2</sup>, que son valores típicos debidos a variaciones en las condiciones atmosféricas, a la presencia de la Vía Láctea y a otros fenómenos. También se ha procedido a calibrar las contribuciones de las diferentes fuentes de contaminación lumínica para determinar la influencia de cada una de ellas en función de su intensidad y distancia al punto de medida. Esta calibración indicará en futuras medidas la conveniencia de incluir en el modelo las contribuciones de ciertas poblaciones.

Los mapas creados en las simulaciones calibradas de los tres lugares de estudio se han realizado en varias bandas del sistema fotométrico Johnson-Cousins pero, por interés para la E-PLN, presentamos los resultados en banda V, que es la más parecida a la sensibilidad del ojo humano.

Este modelo obtiene información sobre intensidad de las fuentes emisoras usando imágenes de satélite. Se calcula la interacción de la luz de esta fuente con los componentes de la atmosfera hasta ser recibido en el punto de estudio. La definición de las condiciones meteorológicas y de las fuentes es flexible, permitiendo así reproducir en gran medida la situación real. Se han simulado imágenes all-sky para las tres ubicaciones estudiadas. En todos los casos los mapas all-sky son coherentes con la información obtenida con los mapas de contribución y con las imágenes procesadas con SQC, ASTMOM y TAS.

Los mapas de contribución nos dan información sobre cuáles son las fuentes que están contaminando el cielo que queremos medir. Se han realizado usando el método presentado por [Bará y Lima \(2019\)](#) añadiendo las modificaciones presentadas en [Linares \(2020\)](#).

En las tres ubicaciones estudiadas, Sierra del Montsec, Pic du Midi y Larra presentan un cielo oscuro y, por lo tanto, poco contaminado en cualquier azimut a partir de 30 grados en elevación. Se especifican las ubicaciones exactas donde se establece el punto de referencia para el modelado, que se corresponden con los lugares desde donde se tomaron las medidas. El primer punto de referencia se estableció en el [Observatorio Astronómico del Montsec](#), situado en lo alto de la Sierra del Montsec, uno de los lugares más adecuados para la observación astronómica por las especiales condiciones atmosféricas y por la oscuridad del cielo. La segunda referencia se estableció en el [Pic du Midi](#), probablemente el complejo más emblemático de los Pirineos, que incluye instalaciones militares, de comunicaciones, turísticas y científicas. El observatorio astronómico jugó un papel destacado en el cartografiado de los posibles destinos de las misiones Apolo a la Luna y en la observación de los planetas por la extraordinaria estabilidad de la atmósfera. El tercer punto de referencia, la frontera entre España y Francia en [Larra](#), Navarra, tiene una gran importancia desde el punto de vista de la biodiversidad por encontrarse en el límite occidental del clima alpino en los Pirineos que coincide

con el límite en el que se puede considerar que comienza a ser determinante la influencia lumínica de las áreas densamente pobladas de la costa vasca y comarca de Pamplona.

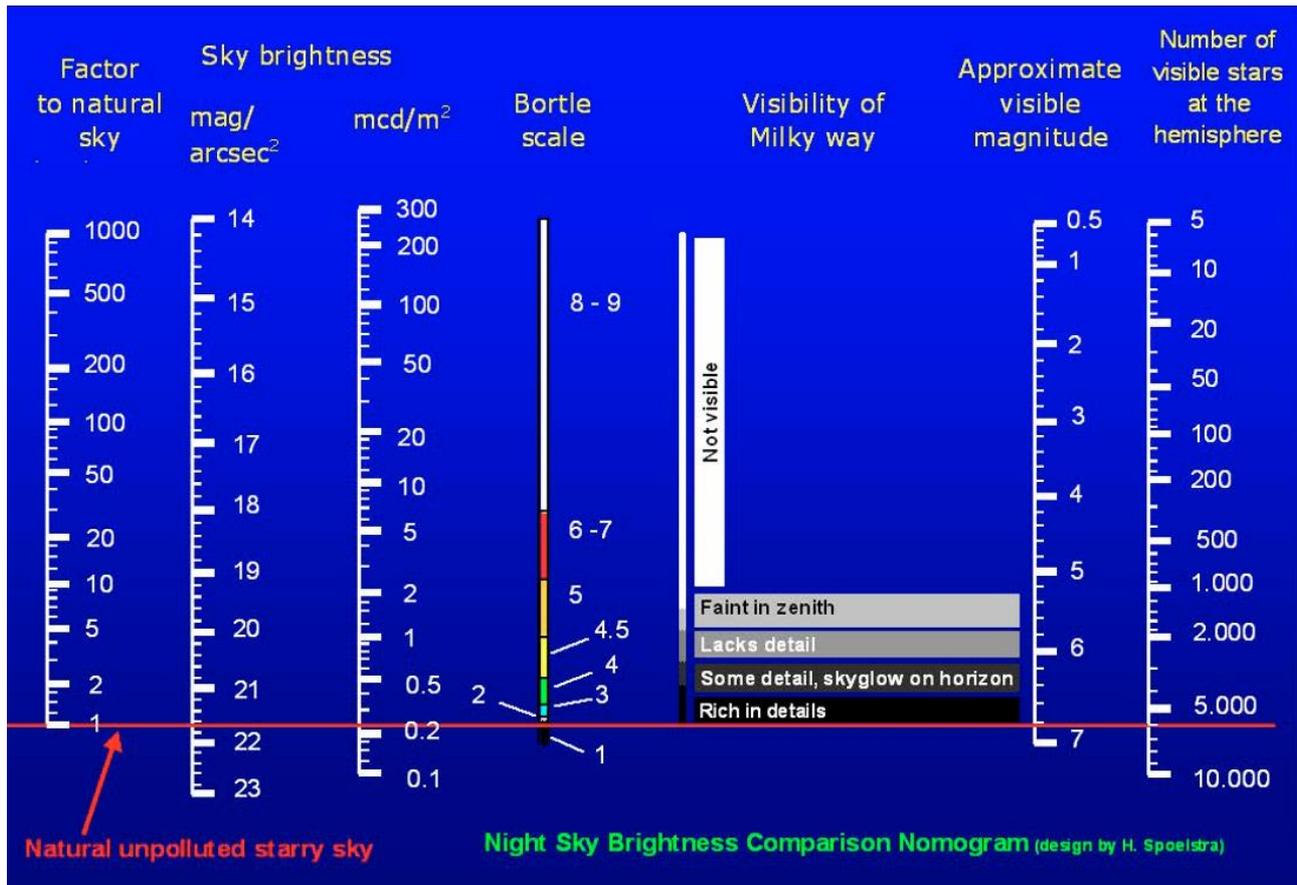


Diagrama para representar las diferentes escalas en las que se mide el brillo del cielo y la visibilidad de los astros y la Vía Láctea. Los sistemas astronómicos que se usan para estas medidas (SQC, AstMon, SQM, TESS-W, TAS...) suelen dar la medida en mag/arcsec<sup>2</sup> mientras que los instrumentos usados por los profesionales de la iluminación utilizan el Sistema Internacional (cd/m<sup>2</sup>).

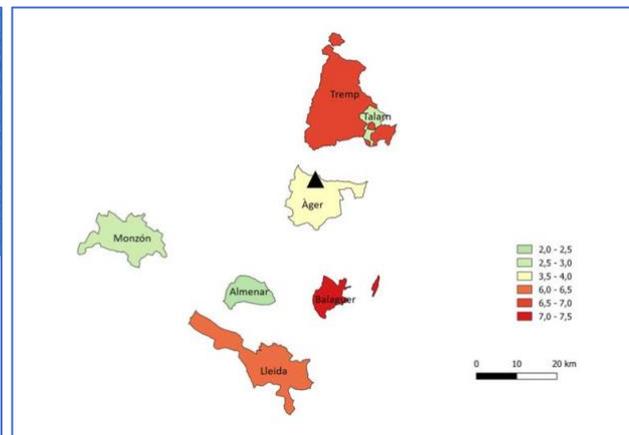
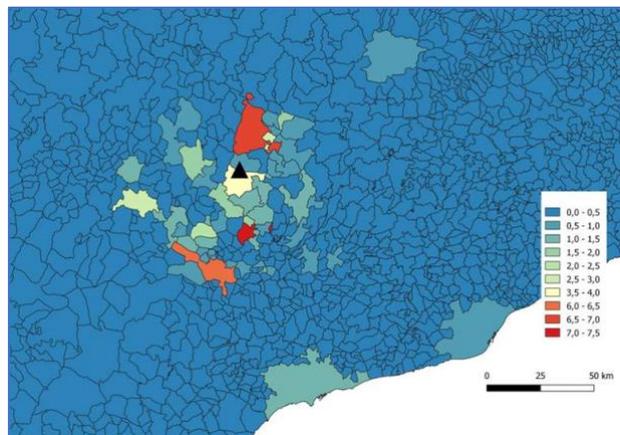
Un cielo sin contaminación lumínica, en un momento en el que no hay actividad solar y sin Vía Láctea suele dar valores próximos a 22 mag/arcsec<sup>2</sup>. En el centro de ciudades como Pamplona, los mejores valores que se alcanzan en el cenit están alrededor de 19 mag/arcsec<sup>2</sup>, lo que significa que apenas son visibles 550 estrellas de las más de 5.000 que podríamos ver y que la Vía Láctea ha desaparecido del cielo por completo.

Diseño de H. Spoelstra

Los resultados sobre la contribución de las poblaciones al brillo del cielo en banda V y los mapas de all sky generados por Illumina y obtenidos por diferentes fotómetros son los siguientes:

## Observatorio Astronómico del Montsec (42° 03' 05" N ; 00° 43' 46" E ; 1.570 msnm)

Municipio	Habitantes	Distancia (Km)	Dirección	% Contribución
Balaguer	20.000	30	170°	7,31
Tremp	6.000	19	50°	6,66
Lleida	140.000	50	185° - 195°	6,44
Áger	700	6	155°	3,88
Monzón	17.000	47	250°	2,66
Talarn	650	20	44°	2,61
Almenar	3.500	32	205°	2,18



Porcentajes de emisión artificial de luz recibida en el Observatorio Astronómico del Montsec, procedentes de diferentes localidades en filtro V del sistema fotométrico Johnson-Cousin.

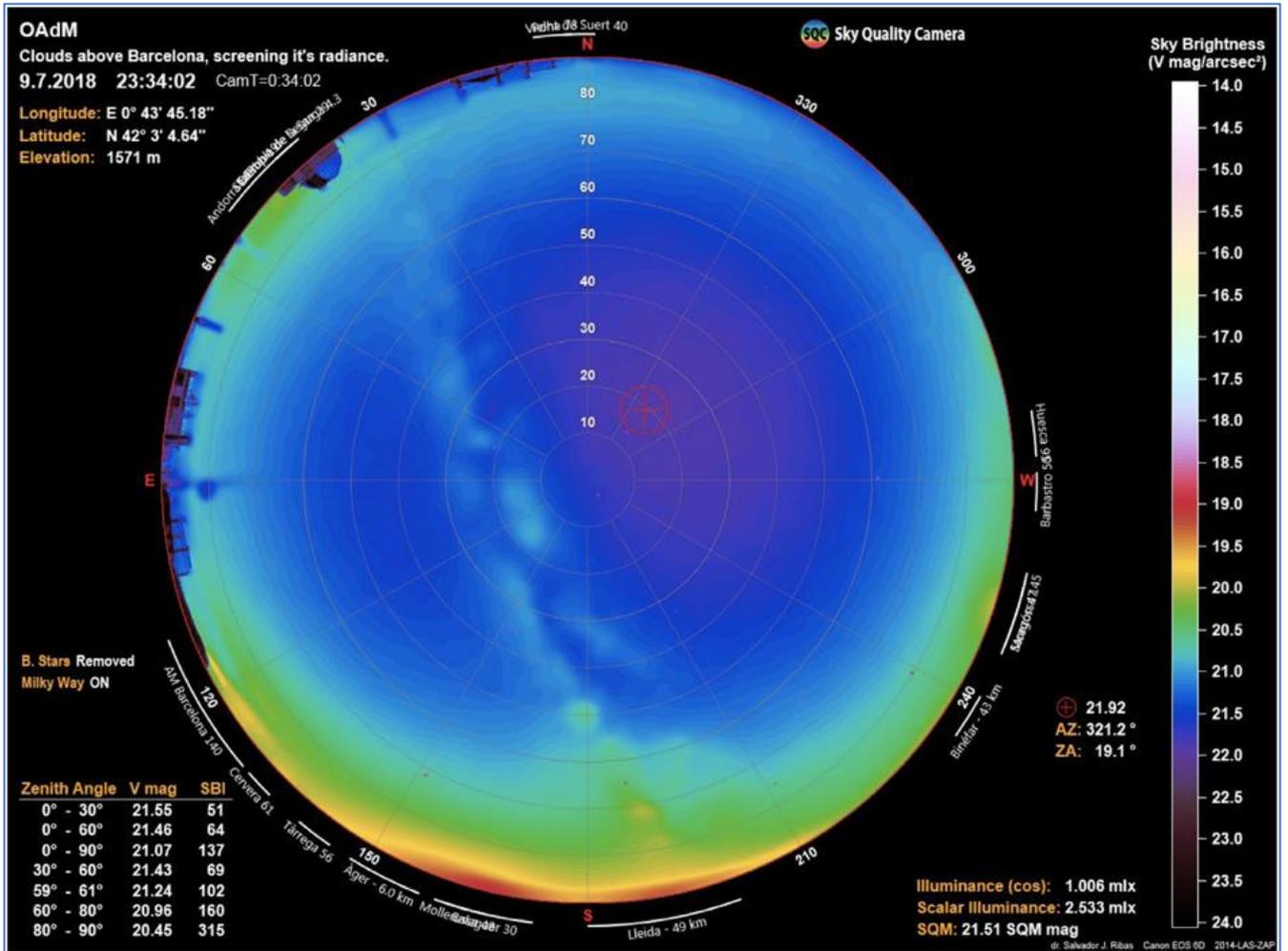
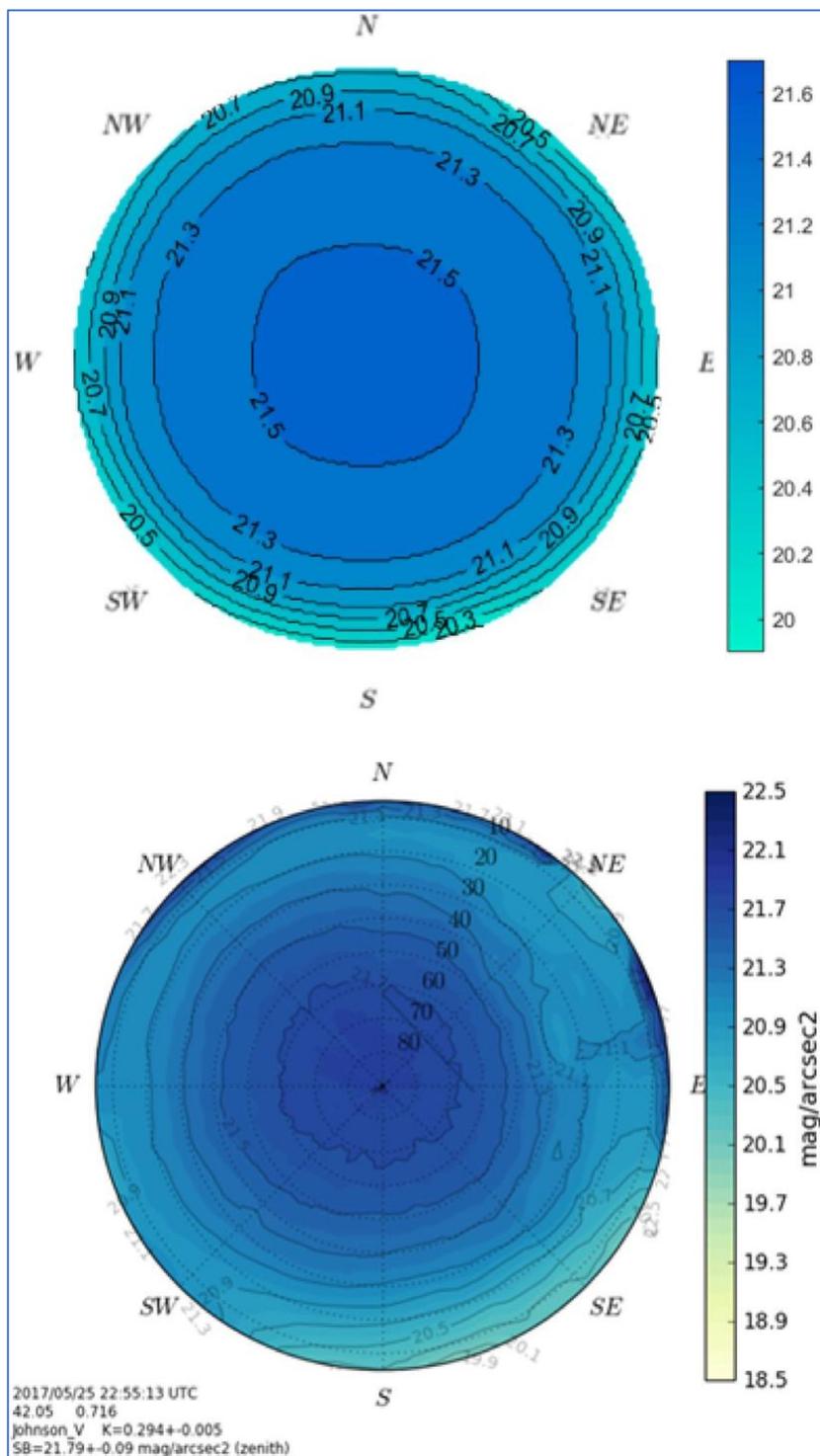


Imagen de la Sky Quality Camera del cielo sobre el Observatorio Astronómico del Montsec. Se aprecia el brillo de la Vía Láctea recorriendo la imagen de NE a SSO. En el horizonte, especialmente hacia el sur se aprecian los halos lumínicos de Balaguer y Lleida. Hacia el SSW se aprecia el hongo de Monzón.

Por encima de 30° el cielo todavía presenta un aspecto prístino.



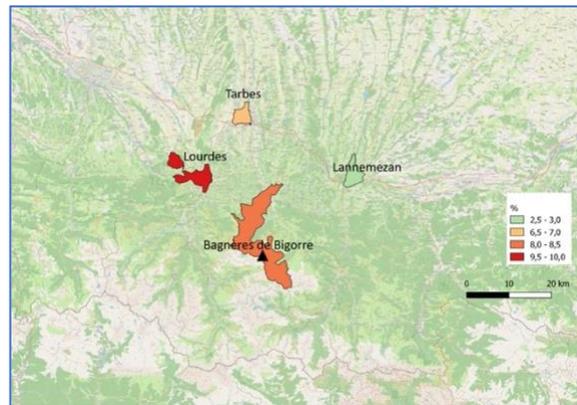
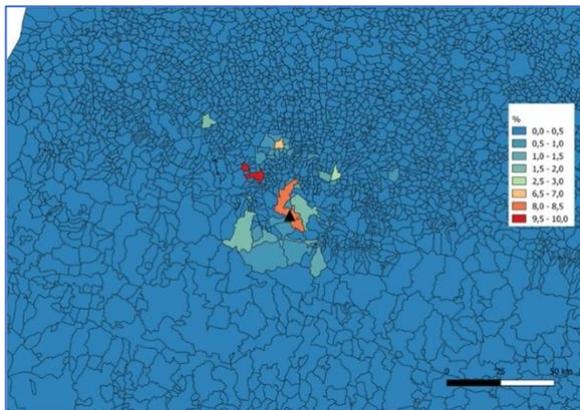
Mapas de brillo del cielo en el Observatorio Astronómico del Montsec en banda V.

Arriba: simulación con el software Illumina.

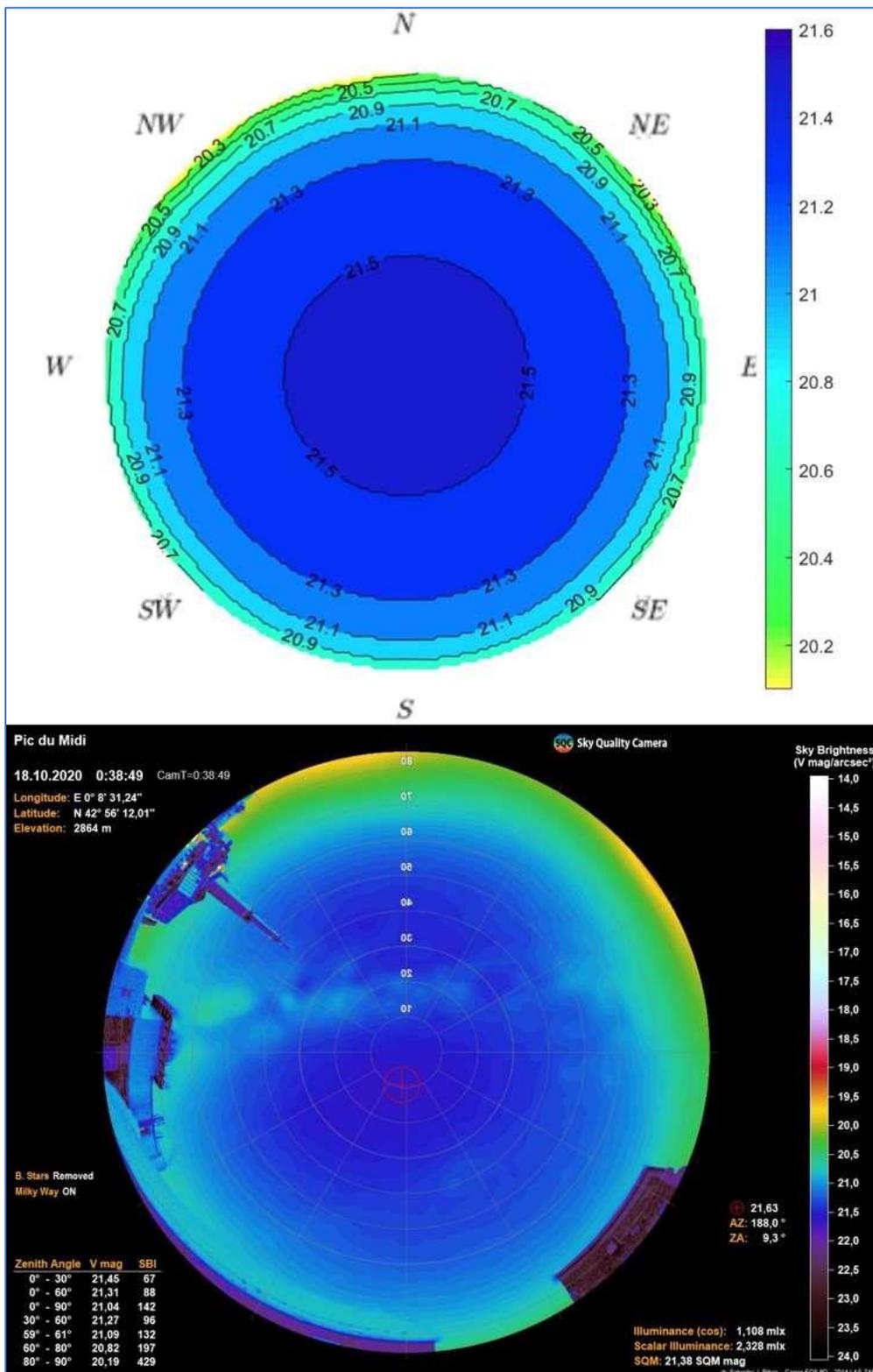
Abajo: datos obtenidos con ASTMON

## Pic du Midi de Bigorre (42° 56' 12" N ; 00° 08' 32" E ; 2.877 msnm)

Municipio	Habitantes	Distancia (Km)	Dirección	% Contribución
Lourdes	14.000	23	320°	9,83
Bagnères de Bigorre	7.600	14	3°	8,40
Tarbes	40.000	33	351°	6,87
Lannemezan	6.000	28	44	2,98
Campan	1.300	9	18°	1,80
Pau	80.000	58	314°	1,74
Cauterets	900	21,5	256	1,72
Luz Saint Sauveur	950	14	240°	1,50
Saint Lary Soulan	850	20	133°	1,36
Sémeac	5.000	32,5	355°	1,27



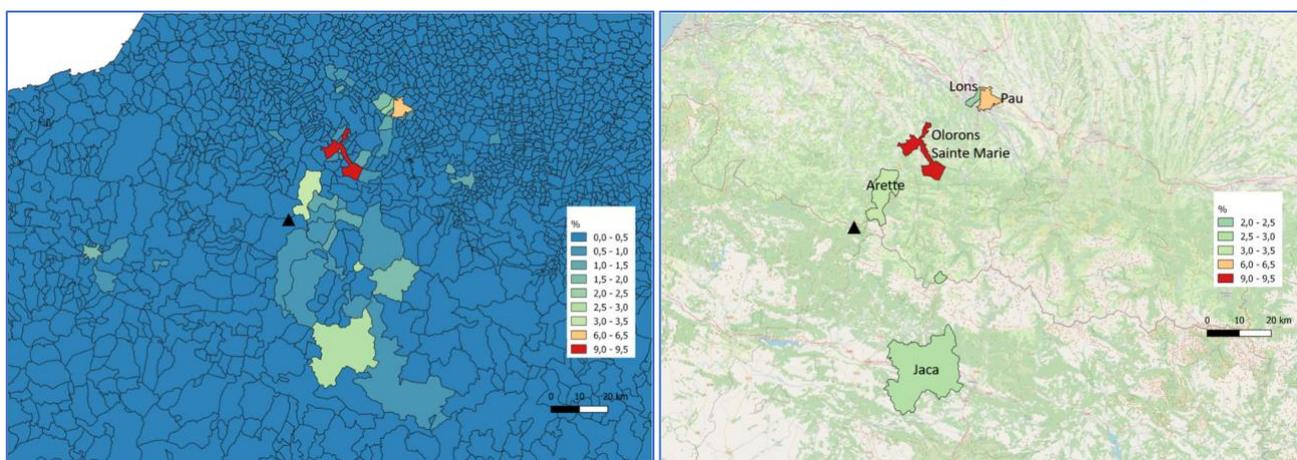
Porcentajes de emisión artificial de luz recibida en el punto de observación, procedentes de diferentes localidades en filtro v del sistema fotométrico Johnson-Cousin



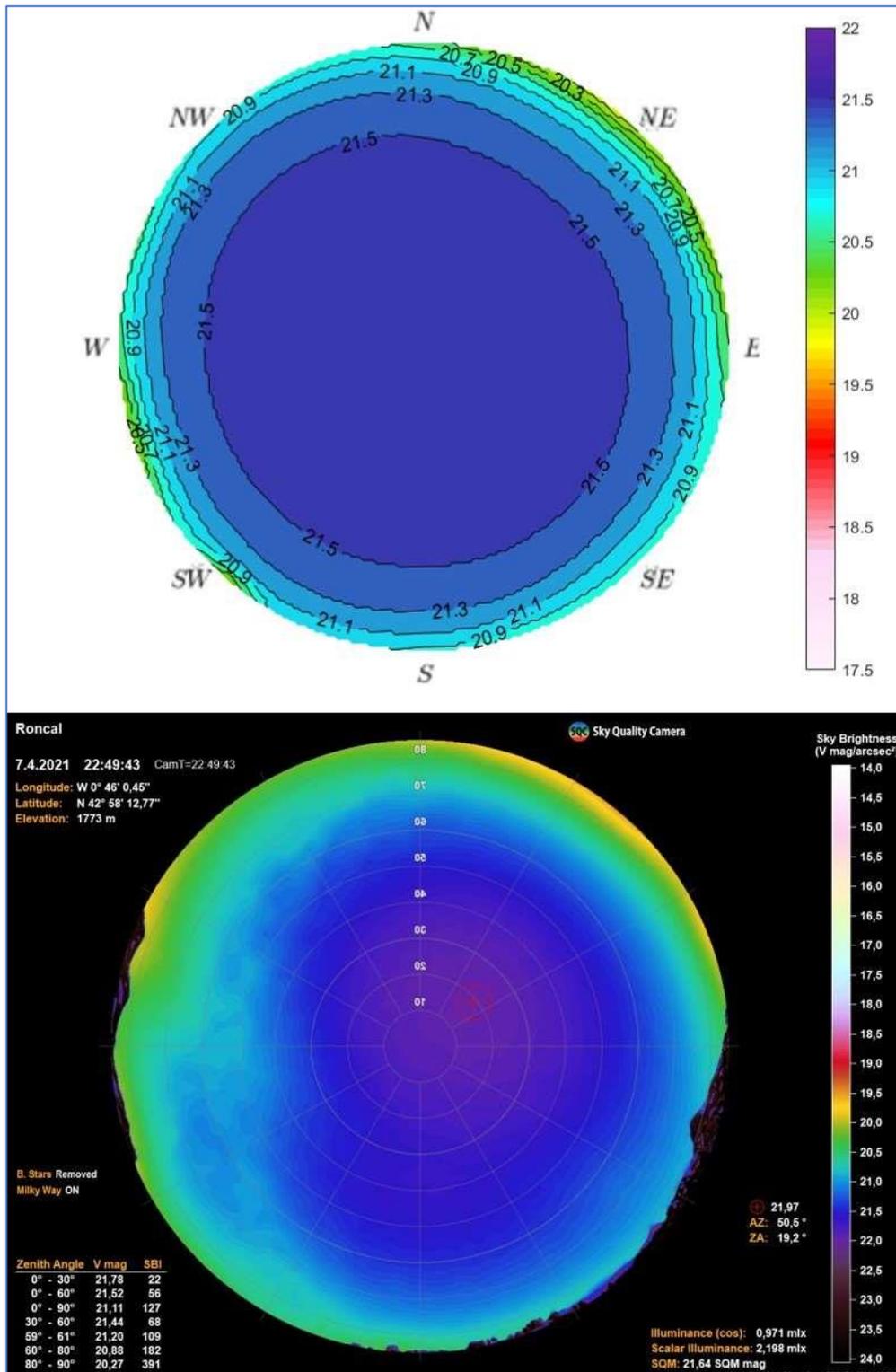
Mapas all-sky del brillo del cielo sobre el Pic du Midi. Arriba: mapa simulado con Illumina. Abajo: mapa SQM modificado.

## Frontera Francia-España en Larra, Navarra (42° 58' 22" N ; 00° 45' 32" O ; 1.700 msnm)

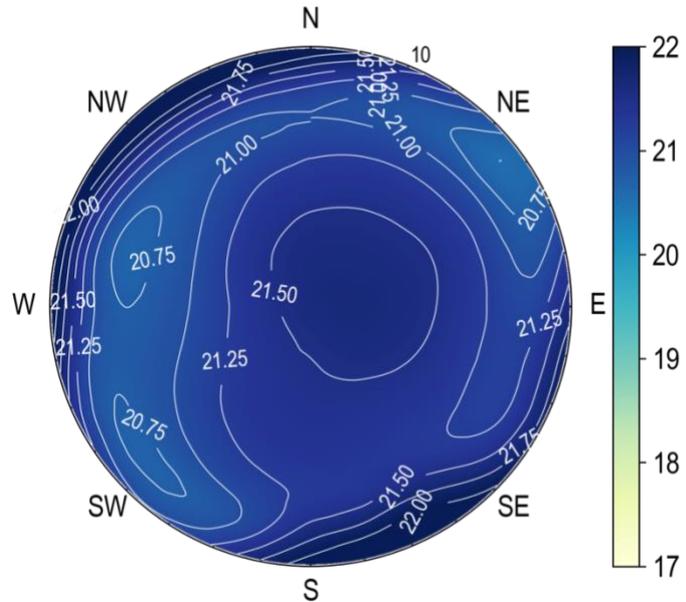
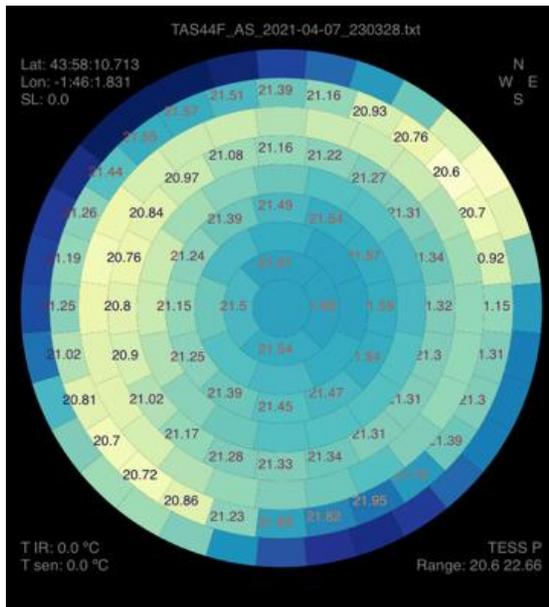
Municipio	Habitantes	Distancia (Km)	Dirección	% Contribución
Olorons Sainte Marie	10.000	27	26°	9,23
Pau	80.000	47	37° - 44°	6,11
Arette	1.000	14	14°	3,50
Jaca	13.000	48	156° - 161°	2,80
Lons	13.700	47	36°	2,14
Lescar	9.700	48	33°	1,97
Pamplona	200.000	75	254° - 259°	1,74
Sallent de Gállego	1.500	41	123°	1,61
Billère	12.600	47	38°	1,42
Bedous	600	13	77°	1,41



Mapas de contribución porcentual al brillo artificial recibido en todo el cielo para el filtro V en el Pico Larra. Arriba: todos los municipios. Abajo: los municipios con una contribución superior al 2%.



Mapas all-sky del brillo del cielo sobre el Valle del Roncal. Arriba: mapa simulado con Illumina. Abajo: mapa SQC modificado.



Gráfica con las medidas directas obtenidas por el instrumento TAS en el lugar y momento en que se realizó la medición con SQC en la frontera España-Francia en Larra. A la izquierda datos obtenidos por Fernando Jáuregui. A la derecha gráfico con las curvas suavizadas realizada por Juan José Iturregui, Red Astronavarra Sarea.

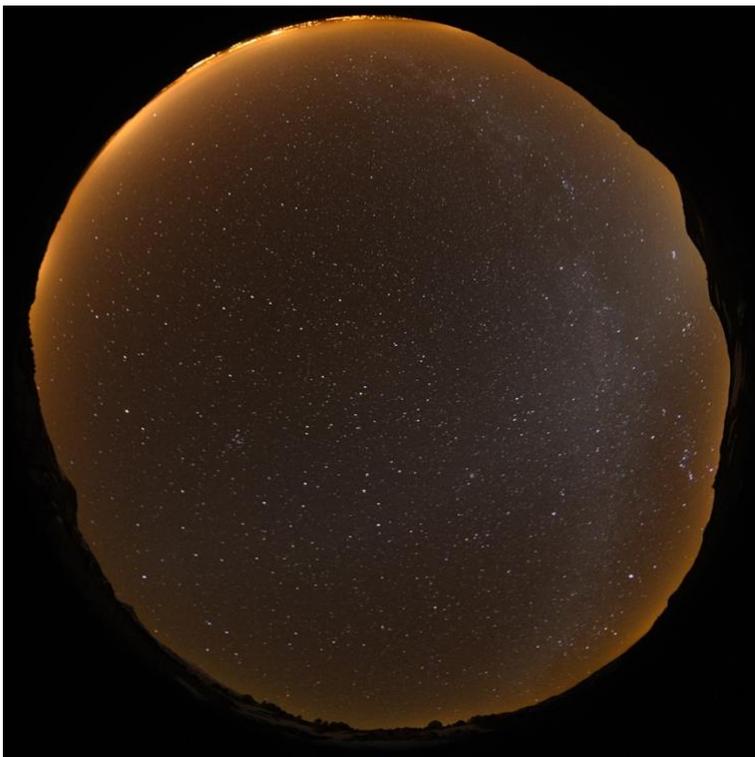
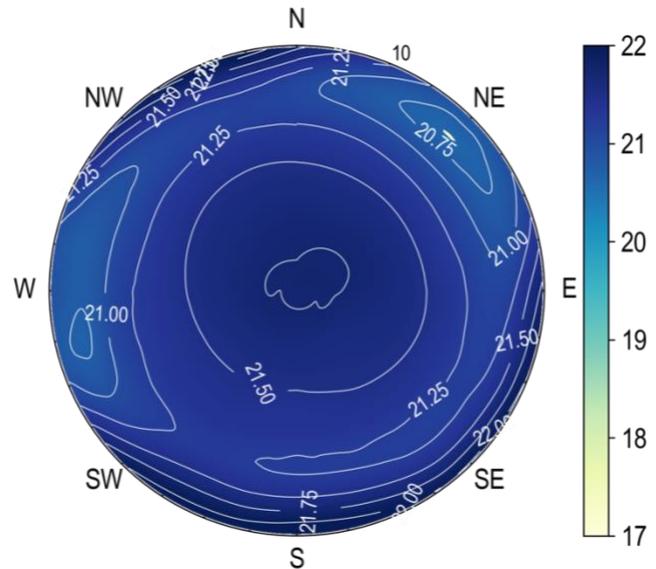
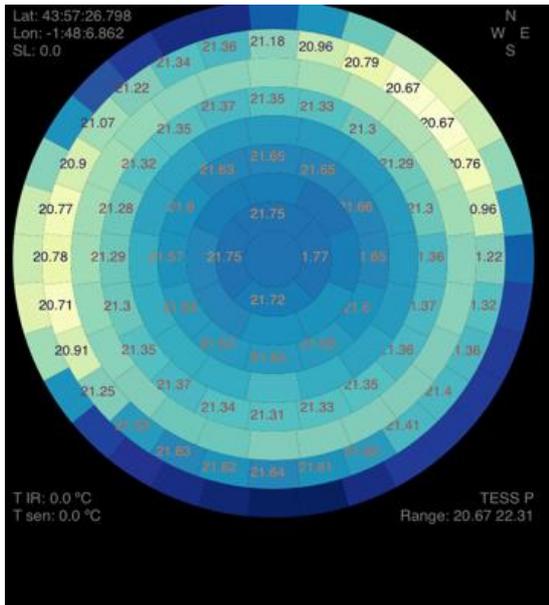


Imagen All Sky en el punto donde se realizó la medición con SQC (Sky Quality Camera) para la modelización del cielo en Larra por parte de Héctor Linares. Imagen de la cámara Nikon D850 con el objetivo ojo de pez Sigma 8mm. El Norte está arriba y el Este a la izquierda.

Imagen tomada a f/3,5 ISO 1600 y 120 segundos de exposición (los parámetros con los que opera la SQC para hacer la fotometría).

El área cenital se aprecia bastante libre de contaminación lumínica, pero la parte del horizonte entre el Este y el Norte se distinguen claramente los halos luminicos de la costa vasco-francesa (Biarritz/Bayona), Pau, Tarbes y Toulouse. En la parte Oeste se aprecia la luz de Pamplona y al Sureste el resplandor luminoso proviene de las ciudades de Jaca, Sabiñánigo, Huesca y Zaragoza.

Foto: Fernando Jáuregui



Gráfica con las medidas directas obtenidas por el TAS. A la derecha y gráfico con las curvas suavizadas en el aparcamiento del edificio de El Ferial. Este lugar se encuentra a unos kilómetros de la frontera y no hay visión directa de las poblaciones francesas. Los valores de oscuridad son mayores aquí y todavía se miden valores de cielo más oscuros en el valle de Belagua, como consecuencia de la menor altura y, por lo tanto, mayor extinción atmosférica de la luz de las estrellas.

## CONCLUSIONES

En los tres casos estudiados la contribución más importante al brillo del fondo de cielo en banda V se debe a la presencia de poblaciones de tamaño intermedio (entre 10.000 y 20.000 habitantes) en un entorno de entre 20 y 30 kilómetros.

No obstante, las influencias de las grandes capitales rivereñas de los pirineos, no aparece en los datos de estas tres localizaciones con un efecto importante, aunque, en las fotografías se aprecian claramente sus halos luminosos sobre el horizonte. Barcelona, Toulouse y Zaragoza aparecen en casi todos los paisajes nocturnos que hemos fotografiado desde distintas localizaciones pirenaicas, en particular desde el Pic du Midi, desde donde puede apreciarse un porcentaje muy importante de la cadena montañosa.

Por su contribución a la luz artificial que se recibe en estos tres lugares de estudio, se ha de tener especial cuidado con el alumbrado de las ciudades que más afectan. En concreto:

En el Montsec **Balaguer, Tremp y Lleida** capital suman más del 20% de la luz artificial de su cielo, con contribuciones similares de cada uno de ellos. Visualmente también se aprecia en el horizonte el resplandor del **área metropolitana de Barcelona** y, en los últimos años, se ha visto cómo cobraba importancia también el halo lumínico de **Monzón**, una población de 17.000 habitantes.

En el Pic du Midi, aunque hay línea visual directa de muchos municipios cercanos, son **Lourdes, Bagnères de Bigorre y Tarbes** los que más afectan a su cielo, sumando entre los tres más del 25% de la contaminación lumínica medida y modelada. También es destacable la presencia de los halos lumínicos combinados de **Saint Gaudens y del área metropolitana de Toulouse**.

En el caso de Larra, también Pamplona y la costa vasca se aprecian visualmente en su cielo nocturno (principalmente debido a la habitual presencia de nubes), pero los municipios más contaminantes lumínicamente son **Oloron Sainte Marie** y **Pau** (alrededor del 15%). Si añadimos al cercano municipio de **Arette** y a la capital del Pirineo, **Jaca**, entre los cuatro municipios suman más del 20% de la contaminación lumínica en Larra. Si nos fijamos en la localización de los diez municipios que más afectan al cielo de Larra, vemos que cuatro se encuentran en **el área metropolitana de Pau**: Lons, Lescar, Billère y la propia Pau. Entre las cuatro localidades suman casi el 12% de la contribución a la contaminación lumínica en Larra, por lo que es especialmente importante un correcto uso y diseño de su alumbrado. También se aprecia visualmente en el horizonte Este-Noreste la luz de **Tarbes** y el halo lumínico combinado de las localidades de **Bedous, Lourdes y Argelès-Gazost**.

Por su influencia en dos de los tres sitios estudiados, habría que prestar especial atención a los alumbrados de Pau, Tarbes y Lourdes. Los tres tienen influencia en la calidad de los cielos del Pic du Midi y de Larra.

Cuando se pasan muchas noches en estos, y en otros lugares altos del Pirineo, queda patente que la luz no conoce fronteras ni demarcaciones territoriales. La solución al problema de la contaminación lumínica de los cielos pirenaicos solo puede abordarse de forma efectiva si se trata el problema en su conjunto, con políticas de alumbrado comunes y con campañas de sensibilización que lleguen a toda la población.

Desde las cimas pirenaicas se aprecia de forma puntual la luz de las poblaciones cercanas y también la de las grandes ciudades que se encuentran más lejos pero que contribuyen al brillo del cielo. Las imágenes desde el espacio, reflejan como la oscuridad natural del Pirineo está siendo acosada por la luz de las localidades cercanas que se adentran en los valles. Más lejos, las grandes ciudades acechan esa oscuridad con sus potentes y extensas manchas de luz.



Imagen del Pirineo obtenida el 5 de diciembre de 2017 por la tripulación 53 a bordo de la Estación Espacial Internacional cuando ésta se encontraba a 417 kilómetros de altura sobre las inmediaciones de la localidad francesa de Limoges. Se aprecian las grandes superficies iluminadas de las ciudades riverieñas como Barcelona, Toulouse o Zaragoza. También las de tamaño intermedio como Girona, Lleida, Pamplona, San Sebastián, Bayona-Biarritz, Pau, Lourdes, Tarbes, etc. Entre la superficie nevada de las cumbres se aprecian también los "ríos de luz" que invaden los valles pirenaicos entre los que destaca la zona de Andorra y la Vall d'Aran.