

Geoparque de Granada

Estudio de la calidad de su cielo nocturno
a partir de medidas de brillo del cielo

Oficina de Calidad del Cielo. IAA-CSIC

IAA-CSIC



INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA

OFICINA DE CALIDAD DEL CIELO

Geoparque de Granada

Estudio de la calidad de su cielo nocturno a partir de medidas de brillo del cielo

elaborado por

Oficina de Calidad del Cielo, IAA-CSIC

por encargo de

Diputación Provincial de Granada

Granada

2021

Imagen de portada: *Cielo estrellado sobre La Sagra*, de Máximo Bustamante Calabria



Índice general

Nomenclatura	ii
1 Introducción	1
1.1 Objeto del trabajo	1
1.2 Certificaciones	3
1.2.1 Certificaciones IDA	3
1.2.2 Certificaciones <i>Starlight</i>	4
2 Metodología de trabajo	7
2.1 Concepto y medida del brillo del cielo nocturno	7
2.2 Instrumentación.	8
2.3 Adquisición de datos en campo	10
2.4 Procesado de los datos	11
2.4.1 Correcciones de los datos brutos	11
2.4.2 Eliminación de valores anómalos	13
2.4.3 Procesado geoestadístico junto a datos de satélite	13
3 Análisis de los resultados y conclusiones	15
Bibliografía	17
A Cartografía	19

Nomenclatura

Siglas y abreviaturas

Sigla	Nombre completo
APS	Active Pixel Sensor
ASTMON	All Sky Transmission Monitor
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DSLR	Digital Single Lens Reflex
FWHM	Full Widht at Half Maximum
GPS	Global Positioning System
HM	Halogenuros Metálicos
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias
IDA	International Dark-Sky Association
IDSP	International Dark Sky Places
ISS	International Space Station
LED	Light Emitting Diode
LMP	Lighting Management Plan
NSB	Night Sky Brightness
OSN	Observatorio de Sierra Nevada
SIG	Sistema de Información Geográfica
SQM	Sky Quality Meter
UT	Universal Time
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
VM	Vapor de Mercurio
VSAP	Vapor de Sodio a Alta Presión
VSBP	Vapor de Sodio a Baja Presión

Símbolos y unidades

Símbolo	Definición	Unidad
NSB	Brillo de fondo del cielo nocturno	<i>magnitudes por segundo de arco cuadrado</i> [mag/arcsec ²]
R'	Radiancia	<i>Vatios por metro cuadrado y estereorradián</i> [$Wm^{-2}sr^{-1}$]
L_V	Luminancia	<i>candela por metro cuadrado</i> [cd/m ²]
λ	Longitud de onda	<i>nanómetros</i> [nm]
ν	Frecuencia	<i>Hercios</i> [Hz]
T	Temperatura de color	<i>Kelvin</i> [K]
v	Velocidad	<i>metros por segundo</i> [m/s]
h	Altura sobre el nivel del mar	<i>metros</i> [m]

Introducción

1.1. Objeto del trabajo

Desde hace varias décadas los astrónomos han reivindicado la valoración del cielo nocturno como parte del Patrimonio de la Humanidad, pues el estudio y la observación del Cosmos ha sido (y sigue siendo) parte fundamental del motor que ha permitido el desarrollo y evolución del pensamiento humano. Y como tal no debería negarse a las generaciones presentes y futuras la posibilidad de contemplar y estudiar el cielo estrellado como una parte más de la Naturaleza. Sin embargo, fruto de la obsesión por iluminar todos los rincones del planeta para que no haya impedimento alguno para la actividad económica, la oscuridad natural de la noche -y con ella el cielo estrellado- está desapareciendo. El exceso de luz sale de las ciudades emitido directamente hacia el cielo o difundido por la atmósfera, y crea una burbuja de luz artificial que llega a cientos de kilómetros alterando las condiciones naturales de los ecosistemas: es la contaminación lumínica. La preocupación por las consecuencias de la contaminación lumínica es hoy en día compartida por numerosos colectivos científicos y ambientalistas: endocrinólogos, biólogos marinos, ecólogos, ornitólogos, entomólogos, ecologistas, etc., pues probablemente estemos ante un factor determinante en el declive de la biodiversidad y de nuestra propia salud.

Desgraciadamente no existe una percepción clara del problema, o al menos equiparable a la de otros contaminantes como los gases de efecto invernadero o los vertidos químicos. La generalizada y desastrosa transición a lámparas LED, muy eficientes desde el punto de vista energético, sólo ha agravado el problema al suponer la emisión de luz blanca con una importante componente azul, además de un incremento desmedido e injustificado del nivel de iluminación de los espacios públicos y privados.

La cuestión de la *eficiencia energética* desenfoca el verdadero problema del alumbrado nocturno, no relacionado tanto con la energía que se consume sino con la luz que se emite al iluminar más allá de lo estrictamente necesario.

En este contexto es de enorme interés que surjan iniciativas que impliquen la inclusión del cielo nocturno en el conjunto del Patrimonio (natural, cultural e histórico) de un territorio, y que persigan su salvaguarda para la sociedad, y que al mismo tiempo puedan conllevar una diversificación de la oferta turística de zonas que, por suerte, aún se mantienen alejadas de los flujos masivos de visitantes. Para ello la obtención de alguna de las certificaciones de calidad del cielo nocturno existentes puede resultar útil. Pero no se debe olvidar que las certificaciones no deberían ser el objetivo en sí, sino sólo una herramienta para lograr revertir la degradación imparable de esta parte de la Naturaleza mediante la concienciación e implicación de diferentes colectivos sociales y la asunción de compromisos claros e ineludibles por parte de las administraciones locales.

El presente trabajo es realizado por la Oficina de Calidad del Cielo del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) a petición de la Diputación Provincial de Granada, entidad en la que recae la presidencia y la secretaría técnica del Comité de Coordinación del Geoparque de Granada. Este territorio supone una extensión de 4722 km² situado al nordeste de la provincia de Granada, y abarca 47 municipios pertenecientes en su mayoría a las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar. Pertenece a la Red Europea de Geoparques y ha sido declarado Geoparque Mundial de la UNESCO en julio de 2020 por los paisajes y las singularidades geológicas que lo hacen único. La zona se caracteriza por su gran riqueza geológica, geomorfológica y paleontológica del Cuaternario. Cuenta con cuevas habitadas, además de una gran cantidad de espacios arqueológicos, con una enorme riqueza patrimonial, histórica y cultural, incluyendo 72 Lugares de Interés Geológico, así como más de una decena de centros de divulgación y de interés turístico. Conscientes de la necesidad de preservar el cielo nocturno como parte del patrimonio natural de esta extensa zona, y de las posibilidades de desarrollo asociadas al astroturismo y a la actividad científica, la Diputación Provincial de Granada baraja solicitar alguna de las certificaciones existentes, para lo que es necesario un estudio y diagnóstico de la calidad de su cielo nocturno.

Como parte del desarrollo de este proyecto, se presenta este documento donde se recoge un primer diagnóstico de la calidad del cielo del Geoparque de Granada tomando como referencia el brillo del cielo nocturno, uno de los parámetros que es necesario analizar junto a la transparencia, la nitidez y otros de tipo climático. Se estructura en tres capítulos: en esta introducción se repasarán los requisitos de las certificaciones existentes, cuyos límites de brillo del cielo habrá que tener en cuenta para zonificar el territorio; después se detallará el instrumental y la metodología seguida en el trabajo, tanto para tomar los datos de campo como en su procesado; y en el capítulo 3 se describirán los resultados del análisis de toda la información procesada para concluir con la zonificación del Geoparque según su aptitud para las distintas certificaciones. La cartografía en formato A3 se incluye en un anexo para facilitar su consulta.

1.2. Certificaciones

Las certificaciones de calidad acreditan la idoneidad de un lugar para realizar actividades astronómicas y el compromiso de proteger y conservar el cielo nocturno. La obtención de un certificado es un sello de garantía para la difusión y proyección nacional e internacional de un territorio, que en el caso de entornos rurales puede ser una buena herramienta para fomentar un turismo sostenible como es el turismo astronómico. En la actualidad existen principalmente dos tipos de certificaciones: las emitidas por la Fundación Starlight y las emitidas por la International Dark-Sky Association (IDA). A continuación se exponen los tipos de certificación, sus principales características y sus requisitos.

1.2.1. Certificaciones IDA

IDA es una asociación sin ánimo de lucro con sede en Estados Unidos cuyo fin es proteger el cielo nocturno para las presentes y futuras generaciones, llevando a cabo diferentes programas y actividades de divulgación y educación, todas ellas enfocadas a la conservación del cielo. El programa International Dark Sky Places (IDSP) se fundó en 2001 para alentar a las comunidades, parques y áreas protegidas de todo el mundo a preservar y proteger los sitios oscuros a través de políticas de iluminación responsable y educación pública.

IDA requiere para su certificación de un Plan de Gestión de Iluminación o LMP (siglas en inglés de Lighting Management Plan), un compromiso donde se apliquen actuaciones en el alumbrado exterior para que cumplan una serie de características sobre las luminarias, color de las lámparas, intensidad, señalización, etc. Como requisito mínimo en el momento de la solicitud del certificado se establece que al menos dos tercios (67 %) de la iluminación exterior existente dentro de los límites del santuario, núcleo de la reserva o parques, deben cumplir el LMP o una fracción alternativa aprobada por el Dark Sky Places Committee (Comité de Lugares de Cielo Oscuro) de la IDA. Este compromiso se amplía al 90 % de la iluminación exterior en el plazo de los cinco años posteriores a la recepción de una designación IDA y al 100 % al cabo de diez años. Esto afecta tanto a alumbrado público como privado, de modo que el cumplimiento de estos compromisos requiere que exista una importante concienciación entre la población y los responsables municipales, que puede materializarse en el desarrollo de ordenanzas específicas para la protección del cielo nocturno.

IDA ofrece varios tipos de certificaciones que se pueden considerar para el Geoparque:

- **Santuarios:** debe ser un terreno público o privado, accesible en parte o en su totalidad, que esté protegido legalmente con fines científicos, naturales, educativos, culturales, patrimoniales y/o de disfrute público. El sitio debe proporcionar un recurso excepcional de cielo oscuro donde el brillo del cielo nocturno es habitualmente más oscuro que $21.5 \text{ mag/arcsec}^2$.
- **Parques:** los parques son espacios de propiedad pública o privada protegidos de luz artificial y que ofrecen programas relacionados con la observación del cielo nocturno para los visitantes.

Deben ser terrenos accesibles al público en parte o en su totalidad y que estén legalmente protegidos con fines científicos, naturales, educativos, culturales, patrimoniales, y/o para el disfrute público. El área central del territorio debe proporcionar un recurso excepcional de cielo oscuro, en relación con las poblaciones que lo rodean, donde el brillo del cielo nocturno debe ser habitualmente igual o más oscuro que $21.2 \text{ mag/arcsec}^2$.

- **Reservas:** similares a los parques, pero han de tener una superficie de al menos 700 km^2 , con la delimitación en su territorio de un núcleo central que presente un brillo del cielo nocturno igual o más oscuro que $21.2 \text{ mag/arcsec}^2$.
- **Comunidades:** las comunidades son ciudades, pueblos o municipios que adoptan políticas de iluminación exterior de calidad para la protección del cielo nocturno y con programas de concienciación a los ciudadanos sobre la importancia de los cielos oscuros. No existe ningún criterio de calidad del cielo nocturno asociado con esta categoría.
- **Urbanos:** son lugares que se encuentran a más de 50 km de cualquier agrupación urbana de población igual o mayor a 10000 habitantes, o de 50000 si se define como un área metropolitana de dos o más municipios colindantes. No existe ningún criterio de calidad del cielo nocturno asociado con esta categoría, pero deben cumplir ciertos requisitos. Uno de ellos es divulgar y educar a la población sobre los beneficios de una iluminación exterior adecuada que garantice la seguridad pública y minimice el daño potencial al entorno natural nocturno.

1.2.2. Certificaciones *Starlight*

Estas certificaciones son otorgadas por la Fundación *Starlight*, una entidad sin ánimo de lucro con sede en España creada por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y la consultora *Corporación 5*. La fundación nació en 2009 con el fin de proteger el cielo estrellado y la difusión de la astronomía para salvaguardar tanto el patrimonio científico y cultural que es nuestro cielo como el ecosistema nocturno. Gestiona y coordina varios proyectos y actividades relacionados con este tema ofreciendo una serie de productos y servicios entre los que se encuentran las certificaciones *Starlight*. Existen varias modalidades dependiendo del tipo de territorio que se quiera acreditar, y cada una de ellas requiere un procedimiento específico establecido por la Fundación. Debido a que el Geoparque es un territorio muy extenso y heterogéneo se puede optar a varias.

- **Reserva *Starlight***

Una Reserva *Starlight* es un espacio natural donde se establece un compromiso para la defensa de la calidad del cielo nocturno y de los diferentes valores asociados, ya sean culturales, científicos, astronómicos, paisajísticos o naturales. El espacio a preservar comprende tres zonas de transición dependiendo del grado de protección: desde un área central de cielo oscuro hasta zonas adyacentes a la reserva donde la iluminación debe ser la más adecuada para salvaguardar el cielo nocturno. Se dividen en varias categorías dependiendo de las singularidades de la zona:

Sitios Naturales, Sitios Patrimonio, Sitios Observación Astronómica, Paisajes de las Estrellas, Oasis Starlight - Hábitats Humanos y Sitios Mixtos.

Los requisitos exigidos son: 60 % de noches despejadas (50 % como mínimo); brillo del cielo en el espectro visible con un valor en magnitudes por segundo de arco al cuadrado ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) superior a 21.4; *seeing* (nitidez) de un valor menor o igual a 1 segundo de arco y medida de transparencia en el rango visible menor o igual a 0.15 magnitudes.

■ **Destinos Turísticos**

Los *Destinos Turísticos Starlight* son lugares con poca incidencia de la contaminación lumínica y que gozan de buenas cualidades para la observación de las estrellas. Son aptos para el desarrollo de actividades turísticas basadas en la astronomía, pero además deben tener infraestructuras y actividades relacionadas con la oferta turística: alojamiento, medios de observación al servicio de los visitantes, formación de personal, etc. Si no están disponibles se valora que se considere su desarrollo futuro.

Los requisitos exigidos son: 50 % de noches despejadas; brillo del cielo en el espectro visible con un valor superior a 21 $\text{mag}/\text{arcsec}^2$; *seeing* (nitidez) de un valor menor o igual a 3 segundos de arco y medida de transparencia en el rango visible menor o igual a 6 magnitudes.

■ **Pueblos Starlight**

Se trata de una certificación que está orientada a pequeñas localidades singulares y de carácter rural que quieren llevar a cabo un turismo astronómico sostenible y de calidad, con el objetivo de favorecer el crecimiento económico del territorio y evitar su despoblación. Esta modalidad es similar al Destino Turístico Starlight pero a pequeña escala y con actividades y objetivos más limitados. Estas localidades no tienen que cumplir unos parámetros específicos pero sí deben demostrar que disfrutan de un buen cielo nocturno, a la espera de obtener más adelante las medidas de los parámetros exigidos por la fundación de acuerdo con sus criterios.

■ **Parques Estelares**

Los *Parques Estelares* son lugares asociados generalmente a municipios que protegen el cielo nocturno y que permiten desarrollar en ellos actividades astronómicas de observación, didácticas, culturales o lúdicas. Se trata de miradores impulsados por administraciones, organismos o entidades privadas y habitualmente dirigidos por astrónomos amateur, con el fin de promover la afición por la astronomía.

■ **Parajes Starlight**

Es una calificación pensada para aquellas instituciones, organismos o particulares que simplemente quieren certificar la calidad de su cielo en una determinada zona sobre la que tienen competencias, pero sin intención inmediata para el desarrollo de una actividad astronómica, turística, o de otra índole.

Existen más modalidades de certificación pensadas para la iniciativa privada, como son los *Alojamientos Starlight*, *Hoteles Starlight*, *Campamentos Starlight*, etc., de los que hay varios ejemplos en la zona. Es un tejido ya existente que se debe tener en cuenta a la hora de solicitar certificaciones, especialmente la de Destino Turístico.

Este trabajo se centra en al parte correspondiente a la calidad del cielo relativa al brillo del cielo nocturno, y se tomará como referencia los límites que establecen las categorías de *santuario*, *parque* y *reserva* de IDA, y *reserva* y *destino turístico* de Starlight.

2

Metodología de trabajo

2.1. Concepto y medida del brillo del cielo nocturno

El brillo del cielo nocturno lo produce luz que puede tener básicamente dos orígenes:

- **De origen natural**

Procede de procesos naturales de la atmósfera o del espacio exterior. Principalmente son el *airglow*, que se debe a los procesos de ionización y recombinación de los gases atmosféricos, la *luz zodiacal*, el tenue resplandor originado por la dispersión de la luz solar por las partículas del plano de la eclíptica (el plano donde orbitan los planetas del Sistema Solar) y la misma luz de los cuerpos celestes (Luna, planetas y campos estelares). De estos tipos de resplandor natural del cielo, el que más puede influir en las medidas es el del plano de la Vía Láctea, que en determinadas épocas y horas alcanza las regiones cenitales. El *airglow* puede también ser importante en momentos de alta actividad solar, pero no ha sido el caso durante la toma de datos de este trabajo.

- **De origen artificial**

Procede de las fuentes de luz artificial: alumbrado exterior nocturno (público y privado), actividades agropecuarias, mineras e industriales que tienen lugar de noche, transporte, satélites de órbita baja, etc. En las zonas habitadas del planeta supone la inmensa mayoría del resplandor del cielo nocturno en ausencia de Luna. Al salir de su fuente de emisión, la luz interactúa con los gases y partículas de la atmósfera y es dispersada de varios modos según su longitud de onda, de modo que cuanto mayor sea el espesor de atmósfera que atraviese a mayor distancia

puede llegar. Los fenómenos de dispersión dependen tanto de la longitud de onda de la luz como del tamaño de la partícula o molécula con la que interactúan, y son especialmente importantes con la luz azul (dispersión de Rayleigh); por otro lado las partículas y aerosoles también interactúan con la luz reflejándola en distintas direcciones (difusión de Mie), de modo que cuando la luz se emite en ángulos rasantes puede llegar mucho más lejos de su foco, especialmente si tiene componente azul.

Por tanto cuando se dirige la mirada al cielo nocturno en lugares habitados llegan al ojo fotones en su mayoría procedentes de fuentes artificiales (tanto cercanas como lejanas), y cuanto más nos alejemos de las fuentes artificiales será más apreciable el resplandor natural del cielo debido a la Vía Láctea, a la luz zodiacal y al airglow. Este estudio se centra en el brillo del cielo nocturno de origen artificial, aunque para su correcta estimación también se tendrá en cuenta el resplandor natural de los campos estelares. Se han escogido noches sin Luna, totalmente despejadas, sin intrusiones de polvo sahariano, estables y con unas condiciones meteorológicas similares.

Para la medida del brillo del cielo nocturno se utiliza como unidad la *magnitud* astronómica por unidad de superficie angular (*segundo de arco cuadrado*), pues fue entre los astrónomos donde surgieron los primeros estudios sobre este tema. Es la unidad utilizada para el brillo de los objetos celestes y tiene su origen en la escala que Hiparco ideó para clasificar las estrellas por su brillo aparente. Hay que tener en cuenta que esta unidad es de tipo logarítmico, pues se trata de una escala de origen visual, y el ojo no tiene una respuesta lineal a la luz. Por tanto a veces es necesario trabajar en otras unidades que representen directamente el flujo luminoso, como la radiancia o la luminancia.

La medición del brillo se realiza con dispositivos fotométricos, dotados de un sensor en cuya superficie los fotones de luz son capaces de arrancar electrones, y de un sistema capaz de convertir esta señal en una lectura que pueda ser procesada por un software y ser convertida a unidades de flujo luminoso y, posteriormente, a magnitudes. En el mercado existen varios modelos de fotómetros diseñados para medir el brillo del cielo y que directamente ofrecen valores en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. A continuación se describen los instrumentos utilizados y el método seguido para el procesado de las medidas.

2.2. Instrumentación

Para la obtención de las medidas de brillo de cielo nocturno en el territorio del Geoparque se ha hecho uso de una unidad móvil formada por tres detectores SQM-LU (Sky Quality Meter, por sus siglas en inglés y LU por su conexión USB) junto con un receptor GPS (modelo Qstarz BT-Q818XT 10 Hz) permitiendo la georreferenciación de los datos. Conectando los dispositivos situados en el exterior del vehículo a un ordenador portátil se ha podido mapear varias zonas del territorio proporcionando registros de forma automática y continuada cada 5 segundos. El software utilizado es el comercial *Unihedron Device Manager* que permite en su configuración tomar medidas de brillo de cielo de los diferentes fotómetros junto con las coordenadas geoespaciales proporcionadas por el GPS [1].

El detector SQM es un pequeño fotómetro fabricado por la empresa canadiense Unihedron que mide el brillo de cielo nocturno. Muy fácil de usar por lo que es muy utilizado por los astrónomos amateur y además se obtienen medidas lo suficientemente precisas [2] para llevar a cabo investigaciones científicas sobre contaminación lumínica [3], [4],[5], [6]. Los valores proporcionados por estos detectores se expresan en magnitudes por segundo de arco cuadrado ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) con un error sistemático según el fabricante de un 10 % ($0.1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$). Hay que hacer notar que $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ es una unidad de tipo logarítmico que se utiliza comúnmente en astronomía y astrofísica, de modo que a menor valor más brillante es el cielo nocturno. El campo de visión de este modelo de SQM se limita a unos 20° en el zenit. Este dispositivo lleva acoplado un filtro Hoya CM-500 proporcionando una respuesta espectral efectiva en el rango de longitudes de onda entre 400 y 650 nm y que se superpone a las bandas de los filtros B y V utilizadas en fotometría astronómica que se encuentran entre los 320 y 720 nm del espectro [7].

Para poder medir los cambios de color que se producen en el brillo de cielo nocturno debido a la contribución artificial es necesario tener información de color. Esto es posible colocando filtros adicionales a los detectores para que sólo dejen pasar la luz en determinados rangos de longitudes de onda. Con este fin, a dos de los tres sensores se les ha añadido los filtros B (300 - 500 nm) y V (500 - 700 nm) del sistema fotométrico de Johnson. El tercer detector no lleva ningún filtro adicional que no sea el suyo propio de fábrica, ya comentado en el apartado anterior. Los sensores están dentro de una carcasa que sirve para proteger al fotómetro y sujetar bien los detectores a la interfaz que se ha fabricado para adaptarlos al vehículo. Debido a la carcasa nuestras medidas han sido corregidas sustrayendo un valor de $0.11 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$.

Para llevar a cabo la calibración de los datos obtenidos de los dispositivos SQM con filtros Johnson se utilizó el detector ASTMOM (All-Sky Transmission MONitor). Este instrumento mide el brillo del cielo en cuatro de las cinco bandas de BVRI de Johnson mediante un detector de imágenes CCD con un objetivo ojo de pez que le permite medir el brillo de cielo con un campo de visión de 180° [8] y no solo en el cenit como el SQM. El instrumento es totalmente robótico, realizando todas las tareas de calibración y reducción de datos astronómicos de forma automática y obteniendo mapas del brillo del cielo durante la noche. El ASTMOM que se ha utilizado se encuentra ubicado en el tejado del edificio principal del Observatorio de Sierra Nevada (OSN), instalación ubicada en la Loma de Dílar de Sierra Nevada a 2900 m de altitud. Las medidas de los dispositivos SQM se calibraron de forma cruzada con las del ASTMOM en sus respectivas bandas utilizando los valores de la posición cenital. Esto es posible ya que las respuestas espectrales de los detectores SQM a los que se acoplan filtros B y V de Johnson coinciden bastante bien con las proporcionadas por los filtros astronómicos correspondientes [2]. Por tanto el error de calibración $0.1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ es solo para el SQM que no tiene filtro adicional, ya que los dos dispositivos que sí los tienen acoplados están calibrados y probablemente pueden alcanzar un mejor rendimiento.

2.3. Adquisición de datos en campo

Las medidas se han llevado a cabo en diferentes salidas nocturnas con el fin de cubrir en todo lo posible la zona del Geoparque, siempre en ausencia de Luna y con una meteorología estable, es decir, sin nubes y sin polvo sahariano para evitar en lo máximo posible datos distorsionados o sesgados. Para calibrar los depositivos móviles con los datos del ASTMON se hizo una salida adicional al Observatorio de Sierra Nevada.

Las noches de adquisición de datos han comenzado y finalizado en Granada capital la mayoría de las veces, aunque en ocasiones se han iniciado y terminado en diferentes municipios dependiendo de la estrategia programada para cada noche. Principalmente se han utilizado carreteras comarcales para recorrer el mayor número de términos municipales que componen el Geoparque, así como las vías urbanas de algunas poblaciones con el fin de poder ver in-situ las características de su alumbrado. También se han realizado algunos tramos por autovía con el objetivo de pasar junto a infraestructuras privadas como restaurantes, hoteles, estaciones de servicio e instalaciones de diversa índole (industriales, energéticas, logísticas, etc.), que en la mayoría de los casos están sobreiluminadas. Las características comunes de este alumbrado (procedente principalmente de carteles luminosos y focos mal orientados) son una alta intensidad lumínica a lo largo de toda la noche y su temperatura de color de 4000 K e incluso superior (fría o muy fría).

Todos los recorridos que se han realizado en las diferentes salidas se pueden ver en el mapa número 2 (que se adjunta a este informe dentro del Apéndice A), donde se representan los datos de brillo del cielo nocturno para cada coordenada geográfica, correspondiendo el color con los diferentes valores obtenidos con el SQM con filtro V.

A continuación se describen los recorridos realizados.

- **Salida 1:** noche del 10 al 11 de septiembre de 2021

El itinerario pasó por los municipios de La Peza, Cortes y Graena, Purullena, Guadix, Benalúa, Fonelas, Villanueva de las Torres, Dehesas de Guadix, Alicún de Ortega, Pedro Martínez, Gobernador, Morelábor y Huélago. Se atravesaron vías de los centros urbanos de Lopera, Benalúa, Fonelas, Villanueva de las Torres, Dehesas de Guadix, Alicún de Ortega, Pedro Martínez y Morada.

- **Salida 2:** noche del 11 al 12 de septiembre de 2021

En esta salida se recorrieron los municipios de La Peza, Darro, Cortes y Graena, Purullena, Guadix, Gor, Baza y Cúllar, hasta llegar a El Contador (ya en la provincia de Almería). Debido a que casi todo el recorrido se hizo por la autovía A92 no se transitó por el interior de ningún centro urbano, pero sí se aprovechó para pasar por las inmediaciones de aquéllos con más población, como Guadix o Baza. Dentro del municipio de Cúllar se visitó el Sauco y los alrededores. En este itinerario se inspeccionaron varias instalaciones privadas muy contaminantes como el hotel Abades de Guadix, la estación de servicio BP o el centro logístico de Mercadona.

- **Salida 3:** noche del 10 al 11 de noviembre de 2021

En el tercer itinerario se recorrieron los municipios de Guadix, Valle del Zalabí, Aldeire, La Calahorra, Ferreira, Alquife, Lanteira, Jerez del Marquesado, Albuñán, Cogollos de Guadix, Purullena, Cortes y Graena y La Peza. Se atravesaron vías de los centros urbanos de Guadix, La Calahorra, Aldeire, Alquife, Lanteira, Jerez del Marquesado y Cogollos de Guadix. La principal infraestructura privada contaminante que se visitó fue la central de energía solar Andasol.

- **Salida 4:** noche del 3 al 4 de diciembre de 2021

Se recorrieron los municipios de Guadix, Gor, Baza, Cúllar, Galera, Huéscar, Puebla de Don Fabrique, Castril, Cortes de Baza y Benamaurel, así como las vías de los centros urbanos de Cúllar, Puebla de Don Fadrique, Fátima y Almontaras. Como parte de este recorrido se hizo por la autovía, pasamos cerca de poblaciones de Guadix, Baza y Huéscar, que como ya hemos dicho anteriormente son las poblaciones del Geoparque más contaminantes desde punto de vista lumínico. En esta salida se comenzó a medir en el centro logístico de Mercadona en Guadix.

2.4. Procesado de los datos

Los datos brutos adquiridos con el instrumental descrito han sido sometidos a varias correcciones, así como un procesado estadístico previo a la elaboración de un mapa de brillo del cielo.

2.4.1. Correcciones de los datos brutos

Los datos brutos tomados en campo con los dispositivos SQM conectados a GPS incluyen la siguiente información:

- Fecha y hora UT
- Fecha y hora UT+1
- Temperatura (grados Celsius)
- Cuentas (número de electrones)
- Frecuencia (Hz)
- Brillo del cielo ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$)
- Latitud (grados)
- Longitud (grados)
- Altura h (m)
- Velocidad v (m/s)
- Satélites (número de satélites GPS)

Las medidas de brillo del cielo así tomadas necesitan tres correcciones:

- **Corrección instrumental resultado de la calibración de los dispositivos**

Como se ha descrito en el apartado anterior sobre el instrumental, la adición de filtros o la misma protección de la carcasa hace necesaria la calibración de los equipos para tener en cuenta el oscurecimiento adicional que provocan los nuevos elementos. Ésta se ha realizado comparando las medidas de los SQM con las del equipo ASTMON instalado en el OSN, y supone sustraer a los datos brutos entre 0.11 y 2.09 mag/arcsec² dependiendo de elemento añadido (metacrilato de la carcasa, filtro V o filtro B de Johson).

- **Corrección para sustraer la influencia de la luz parásita de los faros del coche**

Los datos han sido tomados con los dispositivos acoplados en el techo de un vehículo, que por seguridad ha de circular con las luces de cruce encendidas. Estas luces pueden distorsionar la medida de brillo del cielo, especialmente en situaciones en las que haya árboles, taludes o elementos cercanos que puedan reflejar y dispersar su luz. Incluso la misma superficie del coche la refleja afectando a la medida, aun en situaciones de campo abierto. Para estimar esta aportación se han tomado en numerosas ocasiones medidas en un mismo punto con las luces de cruce encendidas y apagadas, llegando a estimar de modo general una aportación media de 0.15 mag/arcsec² en ausencia de obstáculos. Los puntos que coinciden con presencia de arbolado se han eliminado, al igual que aquéllos que han podido verse influidos por el cruce con otros vehículos, tal y como se explica más adelante.

- **Corrección para sustraer el brillo natural del cielo asociado al campo estelar**

Los SQM miden el brillo del cielo en el cénit total (en un cono de 20 grados), sin distinguir la contribución del campo estelar del fondo del cielo. Este campo varía a lo largo de la noche y a lo largo de los días del año, conforme diferentes regiones celestes van pasando por el cénit debido a los movimientos propios de la Tierra. El brillo del campo estelar puede ser significativo cuando coincide con el plano galáctico, donde hay una mayor concentración de estrellas, o con alguna estrella brillante que entre en el campo de visión del SQM. Por eso es imprescindible estimar y sustraer este brillo natural según el momento y lugar de la medida para obtener resultados fiables.

Para hacer esta corrección se han utilizado los datos de brillo del cielo estimados a partir de los datos de la misión GAIA según la metodología de Masana et al. [9] accesibles en la aplicación GAMBONS [10]. Para cada noche de medidas se ha estimado la evolución del brillo natural en el cénit, comparándolo con el momento en que los campos más pobres en estrellas se sitúan en las regiones más altas de la bóveda celeste. Para hacer esta corrección se ha trabajado en unidades de radiancia (en en $Wm^{-2}sr^{-1}$) a través de la siguiente expresión de Sánchez de Miguel et al. [5]:

$$R' = 0,0270038 * 10^{(-0,4)SQM_0} \quad (2.1)$$

Así, una vez que a las medidas brutas (en mag/arcsec²) se les ha hecho la corrección de calibración y por la luz parásita del vehículo, se pasan a unidades de radiancia y se les sustrae la contribución del campo estelar (también en radiancia) en cada momento. El valor resultante se vuelve a transformar a mag/arcsec². Esta corrección elimina el efecto estacional y horario originado por las distintas zonas celestes que se sitúan en las regiones cenitales, y que podrían distorsionar el resultado final.

2.4.2. Eliminación de valores anómalos

Se entiende como valor anómalo aquél que se desvía del comportamiento general del conjunto de datos. Estadísticamente se suele aceptar como atípicos los valores que se sitúan a 1.5 veces el rango intercuartílico (diferencia entre el tercer y el primer cuartil). Si esta diferencia supera 3 veces este rango se considera además un valor extremo. Estos valores pueden ser originados por diversas causas, como son el cruce con otros vehículos, la presencia de arbolado u obstáculos que reflejen la luz de los faros del coche, errores de lectura, datos tomados dentro del entramado urbano y que son afectados directamente por el alumbrado exterior, etc. Previamente a considerar la eliminación de estas medidas es imprescindible un análisis estadístico combinado con el estudio de su distribución espacial, y comprobar su posible causa para discernir si sería correcto eliminarlas o no.

Esta parte del procesado se ha hecho en cuatro fases:

- Análisis estadístico para identificar valores atípicos y de ellos los que son extremos.
- Carga de todos los puntos a un SIG para su visualización espacial.
- Estudio visual sobre ortofotografía aérea de alta resolución para identificar las posibles causas.
- Eliminación de las medidas anómalas dentro de entramado urbano, tramos con arbolado y aquellas cuyo valor no concuerde con el comportamiento de los puntos inmediatamente anteriores o posteriores.

La base de datos resultante, con medidas corregidas y depurada de los valores que son realmente anómalos, se incorpora al programa SIG para el procesado geoestadístico junto a la información de satélite.

2.4.3. Procesado geoestadístico junto a datos de satélite

La información que sirve de base para elaborar el mapa de brillo del cielo es la obtenida a partir las imágenes del instrumento VIIRS-DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite-Day Night Band) del satélite Suomi-NPP (Suomi-North Polar Partnership) y en concreto a partir del estudio del brillo difuso según la metodología de Sánchez de Miguel et al. [11]. VIIRS-DNB es una cámara multispectral durante el día en el visible e infrarrojo mientras que durante la noche en el visible utiliza una banda pancromática con un rango espectral de 500 a 900 nm [12]. Este mapa no es un modelo, sino una

medida directa del brillo que se difunde desde un punto dado hacia el espacio procedente de las fuentes de luz artificial, y que equivale al brillo difuso que llegaría a un observador situado en ese mismo punto desde el cénit. El problema por el que no se puede utilizar directamente este mapa radica en que el instrumento VIIRS es prácticamente ciego a la componente azul del espectro, y por tanto infravalora la luz emitida por la mayor parte del alumbrado LED que se está implementando desde unos años a esta parte. Por eso es necesario hacer un ajuste de este mapa a partir de medidas tomadas en campo con diferentes filtros, de modo que el resultado refleje del modo más fiel posible la situación real. Esto se ha hecho siguiendo los siguientes pasos:

- Carga al SIG y remuestreo del mapa base de brillo difuso de VIIRS para adaptar su resolución a la zona de estudio.
- Carga al SIG de los puntos de medidas corregidas y depuradas de valores anómalos, y asignación a cada punto del valor del mapa basado en VIIRS.
- Estudio estadístico para cada filtro, tomando como variables el brillo real medido en campo y el brillo medido por VIIRS.
- Cálculo de un modelo que relacione las variables descritas y obtención de una función de transformación del mapa base.
- Escalado y transformación del mapa base según el modelo estadísticamente más significativo y con mejor capacidad predictiva.

El resultado es un mapa de brillo del cielo en el cénit ajustado según las medidas reales tomadas en campo, y que sirve para diagnosticar esta variable de calidad del cielo y hacer una zonificación basada en su valor.

3

Análisis de los resultados y conclusiones

Los resultados del proceso descrito en la metodología se reflejan en los mapas anexos a este documento. El mapa 1 representa el brillo del cielo en el cénit estimado a partir de los datos del instrumento VIIRS, y el mapa 2 el recorrido para la toma de datos de campo en movimiento. El resultado del procesado estadístico de esos dos conjuntos de medidas se muestra en el mapa 3, que corresponde al mapa final de brillo del cielo en la banda V para el territorio del Geoparque. El mapa 4 recoge también el brillo del cielo, pero según los límites establecidos para la obtención de diferentes certificaciones, y el mapa 5 la clasificación de los municipios del Geoparque según su valor medio de brillo del cielo. Por último los mapas 6 y 7 representan las zonas y municipios más aptos para las certificaciones consideradas.

Partiendo del mapa 3, de brillo del cielo en la banda V obtenido tras el procesado estadístico de los datos de campo y de satélite, se puede apreciar que el Geoparque de Granada tiene básicamente dos zonas que se pueden considerar oscuras: el extremo nororiental, en una franja limítrofe con las provincias de Jaén, Albacete y Almería; y la parte noroccidental que limita con Sierra Mágina y Sierra del Pozo, en Jaén. Las islas de mayor oscuridad (con más de $21.6 \text{ mag/arcsec}^2$) se encuentran localizadas en la Sierra de La Sagra (entre los municipios de Huéscar y Puebla de Don Fadrique), en una pequeña zona entre los municipios de Pedro Martínez y Gorafe, y entre los municipios de Orce y Cúllar (limitando con Sierra María).

Si tomamos como referencia los límites establecidos para las distintas certificaciones consideradas, resultan los mapas 4 y 5. Estos valores son (en mag/arcsec^2) 21, 21.2, 21.4 y 21.5 para las certificaciones de *destino turístico Starlight*, *parque o reserva IDA*, *reserva Starlight* y *santuario IDA*, respectivamente. El mapa 4 muestra la distribución territorial de brillo del cielo nocturno según estos valores, mientras que el mapa 5 clasifica los municipios del Geoparque según su valor medio. El mu-

nicipio más oscuro es la Puebla de Don Fadrique, seguido de Orce y Huéscar; en el otro extremo se sitúan los municipios de Marchal, Aldeire y Jerez del Marquesado. Es importante tener en cuenta que para el cálculo de estas estadísticas sólo se ha tenido en cuenta el territorio dentro de los límites del Geoparque, de modo que en los casos de municipios con parte de su término fuera (como es el caso de Baza o los situados en las vertientes septentrionales de Sierra Nevada) estas cifras no tienen en cuenta la totalidad de su superficie.

Según el criterio de brillo del cielo se puede llegar a una clasificación del territorio según su aptitud para obtener algunas de las certificaciones mencionadas. Es lo reflejado en los mapas 6 y 7 para los casos de IDA y Starlight respectivamente, y a partir de ellos se deducen las posibilidades que se mencionan a continuación.

■ Santuario IDA

La zona con más posibilidades para obtener esta calificación corresponde a la región oscura del extremo nordeste del Geoparque, que, asemejándose a una "H", discurre en dos bandas paralelas de dirección SO-NE por la Sierra de la Sagra y por el límite con Almería, unidas por la franja existente entre los núcleos de Puebla de Don Fadrique y Huéscar. Se repartiría mayormente entre los municipios de Huéscar, Puebla de Don Fadrique y Orce.

■ Reserva IDA

Teniendo como núcleo oscuro el territorio descrito en el punto anterior, la reserva podría extenderse por los municipios de Huéscar, Puebla de Don Fadrique, Orce, Castilléjar, Galera y Cúllar.

■ Parque IDA

Abarcaría los municipios de Alamedilla, Pedro Martínez, Alicún de Ortega, Dehesas de Guadix, Villanueva de las Torres y Gorafe. Su área central sería la franja entre los núcleos de Pedro Martínez, Villanueva de las Torres y Gorafe.

■ Reserva Starlight

Todos los municipios mencionados en los dos puntos anteriores son aptos para esta certificación, con un núcleo oscuro equivalente, aunque algo más extenso por estar el límite 0.1 mag/arcsec^2 por debajo.

■ Destino turístico Starlight

Es la certificación que permite un límite más bajo de brillo del cielo y podrían optar todos los municipios mencionados con anterioridad, a los que se podrían sumar Castril, Cortes de Baza, Benamaurel, Cuevas del Campo, Freila, Caniles, Gor, Fonelas, La Peza y Huéneja.

El resto de municipios que no han sido mencionados presentan un brillo del cielo en el cénit demasiado elevado para optar a una certificación de calidad, aunque hay algunos con porciones de su territorio que sí podrían entrar como destino turístico Starlight y además conectar las dos regiones oscuras principales del Geoparque: es el caso por ejemplo de Zújar, Baza o Guadix. No obstante estos

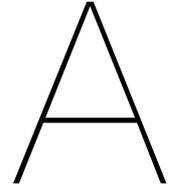
municipios, junto a la mayoría de los del tercio sur del Geoparque, presentan una situación de partida desfavorable.

Bibliografía

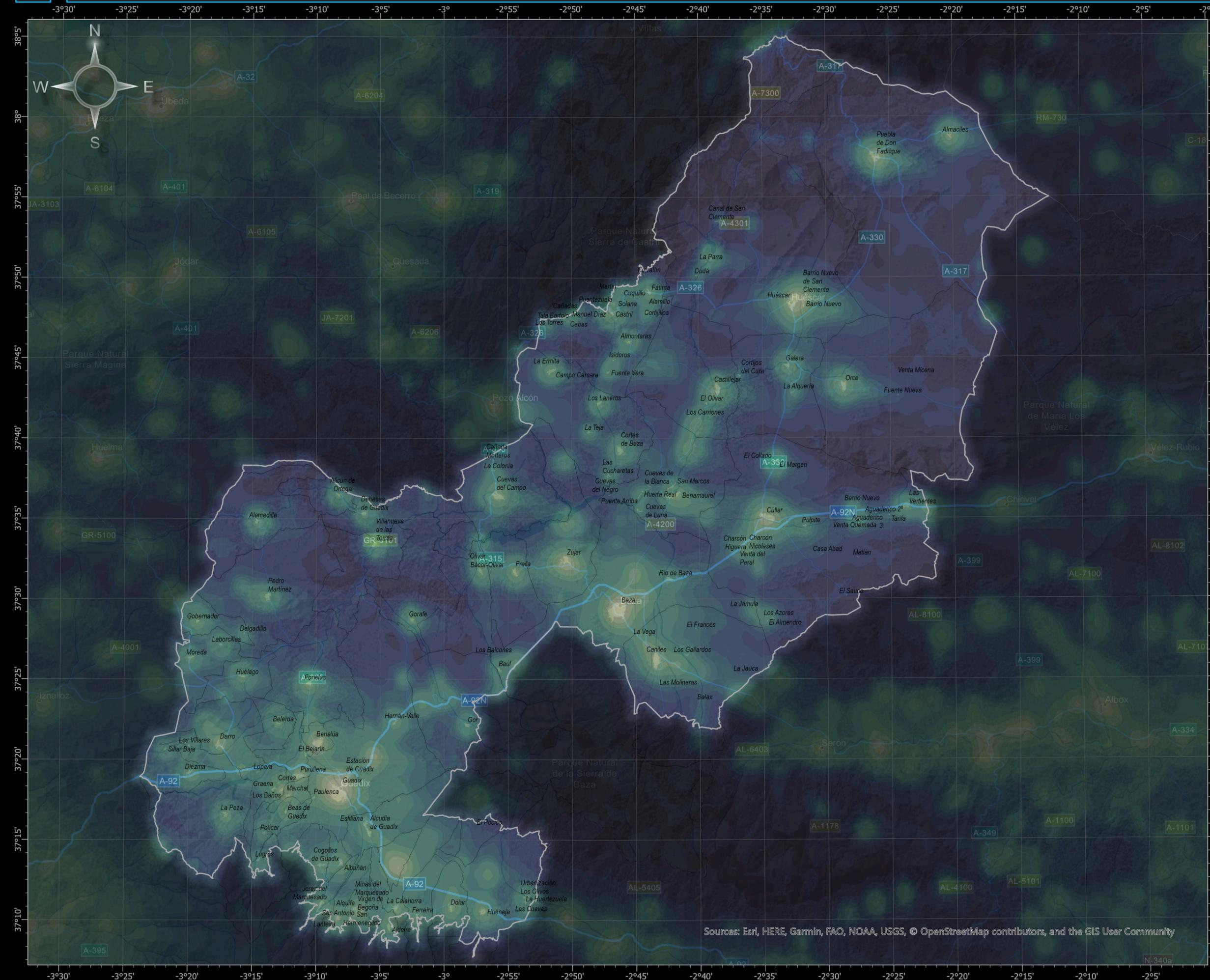
- [1] Unihedron. Sqm-le operator's manual: <https://www.unihedron.com>, 2020. accessed on 2020-02-21.
- [2] P. Cinzano. Night Sky Photometry with Sky Quality Meter. <http://www.lightpollution.it/download/sqmreport.pdf>, 2005. accessed on 2021-12-20.
- [3] Christopher C. M. Kyba, Kai Pong Tong, Jonathan Bennie, Ignacio Birriel, Jennifer J. Birriel, Andrew Cool, Arne Danielsen, Thomas W. Davies, Peter N. Den Outer, William Edwards, Rainer Ehlerl, Fabio Falchi, Jürgen Fischer, Andrea Giacomelli, Francesco Giubbilini, Marty Haaïma, Claudia Hesse, Georg Heygster, Franz Hölker, Richard Inger, Linsey J. Jensen, Helga U. Kuechly, John Kuehn, Phil Langill, Dorien E. Lolkema, Matthew Nagy, Miguel Nievas, Nobuaki Ochi, Emil Popow, Thomas Posch, Johannes Puschnig, Thomas Ruutz, Wim Schmidt, Robert Schwarz, Axel Schwoppe, Henk Spoelstra, Anthony Tekatch, Mark Trueblood, Constance E. Walker, Michael Weber, Douglas L. Welch, Jaime Zamorano, and Kevin J. Gaston. Worldwide variations in artificial skyglow. *Scientific Reports*, 5:8409, February 2015.
- [4] F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, and R. Furgoni. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6):e1600377–e1600377, June 2016.
- [5] A. Sánchez de Miguel, M. Aubé, J. Zamorano, M. Kocifaj, J. Roby, and C. Tapia. Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3):2966–2979, May 2017.
- [6] Máximo Bustamante-Calabria, Alejandro Sánchez de Miguel, Susana Martín-Ruiz, Jose-Luis Ortiz, José M. Vilchez, Alicia Pelegrina, Antonio García, Jaime Zamorano, Jonathan Bennie, and Kevin J. Gaston. Effects of the COVID-19 Lockdown on Urban Light Emissions: Ground and Satellite Comparison. *Remote Sensing*, 13(2):258, January 2021.
- [7] H. L. Johnson and W. W. Morgan. Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas. *Astrophysical Journal*, 117:313, May 1953.
- [8] J. Aceituno, S. F. Sánchez, F. J. Aceituno, D. Galadí-Enríquez, J. J. Negro, R. C. Soriguer, and G. Sanchez Gomez. An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(907):1076, September 2011.
- [9] Eduard Masana, Josep Manel Carrasco, Salvador Bará, and Salvador J Ribas. A multiband map of

the natural night sky brightness including gaia and hipparcos integrated starlight. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(4):5443–5456, Dec 2020.

- [10] Masana et al. 2020. The gaia map of the brightness of natural sky, <https://gambons.fqa.ub.edu/>, 2020. accessed on 2021-12-01.
- [11] Alejandro Sánchez de Miguel, Christopher C. M. Kyba, Jaime Zamorano, Jesús Gallego, and Kevin J. Gaston. The nature of the diffuse light near cities detected in nighttime satellite imagery. *Scientific Reports*, 10:7829, May 2020.
- [12] Alejandro Sánchez de Miguel. Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes. Metodología y resultados. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/31436/1/T37100.pdf>, 2015. Accessed on 2021-12-20.



Cartografía



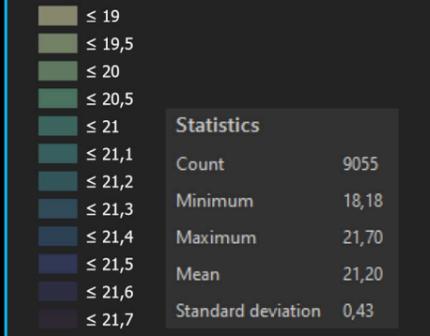
Scale: 1:400.000
 Spatial Reference
 Name: ETRS 1989 UTM Zone 30N
 PCS: ETRS 1989 UTM Zone 30N
 GCS: GCS ETRS 1989
 Datum: ETRS 1989
 Projection: Transverse Mercator

Mapa de brillo del cielo basado en el mapa de Sánchez de Miguel et al. (2020) elaborado a partir de datos del brillo difuso captado por el instrumento VIIRS del satélite SUOMI-NPP.

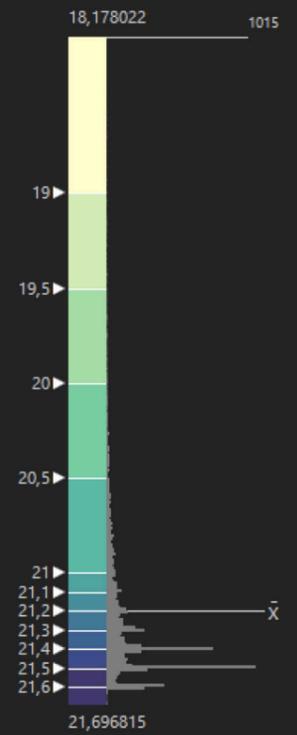
Leyenda

- Límite del Geoparque
- Límites municipales

Brillo del cielo en el cénit (VIIRS) mag/arcsec²



Statistics	
Count	9055
Minimum	18,18
Maximum	21,70
Mean	21,20
Standard deviation	0,43



Sources: Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

