

Datos desde el espacio

«Hemos borrado el firmamento, y solo unos pocos científicos contemplan aún las estrellas, los planetas, los cometas y los meteoros.» Bertrand Russel

[iStock]/Thinkstock

Un análisis de la contaminación lumínica de los municipios españoles de la península.

Esteban Moro @estebanmoro | Profesor Titular Departamento de Matemáticas de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)
Alberto de la Fuente | Analista sénior en Asset Management de BBVA

Una leyenda urbana dice que la Gran Muralla China puede ser vista desde el espacio. Aunque esto no sea cierto, sí que es verdad que es posible ver los invernaderos de Almería o la mina de cobre de Kennecott en Utah (EE.UU.) Sin embargo es por la noche cuando se puede apreciar con mayor claridad la huella de la actividad humana en forma de radiación lumínica. Ciudades, puertos, instalaciones industriales, incluso los grandes cargueros que cruzan el océano son visibles desde el espacio por satélites o astronautas de las estaciones espaciales.

Utilizando como fuente las mediciones de radiancia tomadas por satélite, hemos representado la radiancia lumínica agregada por municipio peninsular en España y buscado las características o dimensiones urbanas que la modelan. En particular, hemos apro-

vechado el repositorio que de forma abierta ofrece desde sus páginas el centro de Información Ambiental de la NOAA¹. En este, se encuentran las mediciones obtenidas por la banda Day/Nights del sensor VIIRS². Este dispositivo viaja a bordo de la plataforma Suomi Nacional Polar-Orbiting Partnership (misión conjunta con la NASA). Para el presente estudio hemos tomado el fichero agregado con las mediciones del año 2015³.

La modelización de la radiancia nos ayuda a identificar qué municipios son los más contaminantes y, por el contrario, los más eficientes en el gasto en alumbrado. Adicional al evidente interés económico, el exceso de iluminación nocturna empieza a ser reconocido como un problema por sus efectos perniciosos para los seres humanos y nuestro entorno

medioambiental. Existe además otra razón cultural y más romántica, la mayoría de los niños y nuevos enamorados que viven y crecen en el mundo urbano no han podido ver nunca el cielo estrellado y su Vía Láctea.

La esposa de Zeus, Hera, amamantaba todas las noches a su hijo y al hacerlo derramaba su leche celestial, dibujando el cielo que peregrinos y pilotos marinos escrutaban en la antigüedad.

Hoy conocemos que la Vía Láctea es un cúmulo de gas y polvo interestelar de donde se suspende una cantidad asombrosa de estrellas. Antes del desarrollo urbano actual, este magnífico espectáculo estaba disponible en las noches despejadas. Hoy en día, debido al exceso de iluminación que invade todo el cielo urbano y sus alrededores, apenas es posible ver unos pocos cuerpos celestes por la noche.

Imagen de la radiancia peninsular logarítmica de la banda *day/night* del sensor VIIRS



Fuente: VIIRS.

Hemos tomado el fichero *geotiff* de la NOAA con las mediciones de la radiancia promediadas durante todo un año y realizado un pre procesamiento de su información. Para la obtención de la imagen peninsular de la radiancia hemos tomado escalas logarítmicas de la variable.

La imagen procesada es especialmente hermosa y muestra zonas de alta emisión coincidente con grandes núcleos urbanos, Madrid, Barcelona, Lisboa, Oporto, que conviven con amplias zonas del interior a «oscuras», zonas de montaña y de la meseta, todas con baja densidad de población.

Para poder agregar la radiancia a nivel municipal, hemos utilizado los ficheros de límites municipales que proporciona desde su centro de descargas el **Instituto Geográfico Nacional (IGN)**. Estos ficheros en formato *shapefiles* permiten cortar y agregar para cada municipio las celdas (pixel) de radiancia del fichero original. Como resultado presentamos un *ranking* con los municipios con mayor radiancia agregada.

La mayor radiancia, como cabía esperar, se corresponde con los municipios con mayor población y actividad, pero también ofrece algunas sorpresas. Zaragoza aparece por delante de Barcelona, y municipios como Cartagena o Jerez de la Frontera lo hacen también de forma destacada y por delante de ciudades con mayor población como Bilbao o Valladolid. Esto nos anticipa que la superficie urbana construida y, en particular, su uso industrial (aeropuertos, polígonos industriales, etc.) abundan en una mayor emisión luminosa.

Para obtener las variables «terrestres» acudimos a diversas fuentes que de manera abierta nos proporcionan distintas administraciones y entidades:

- Población por municipio: Padrón Municipal, Instituto Nacional de Estadística (INE).
- Superficie urbana edificada por municipio: Páginas web del Catastro Nacional, Instituto Estadístico Navarro e Instituto Estadístico Vasco (EUSTAT).
- Gasto público en alumbrado por municipio: Base de datos de presupuestos municipales, Secretaría General de Coordinación Autonómica y Local (SGCAYL).
- Altitud, latitud y longitud por municipio: Google apps.

Al representar la radiancia con respecto a sus posibles variables características, debemos utilizar escalas dobles logarítmicas. La radiancia no sigue una relación lineal con la población o con su tamaño físico. Una ciudad que tenga el doble de población que otra no emite el doble de radiancia sino que lo hace en menor cantidad. Representando por ejemplo la radiancia per capita por la población, puede comprobarse como disminuye a medida que aumenta el tamaño del municipio.

Este tipo de comportamiento es conocido como **Ley de escala de las ciudades**. La radiancia y el gasto en alumbrado demuestran tener un comportamiento sublineal. Físicamente esto queda justificado en el desarrollo urbano de las ciudades, que por lo general se vuelven más densas cuanto mayor es su población, lo que permite 'alumbrar' en una misma superficie a una mayor cantidad de individuos y actividades y, por lo tanto, a menor coste. Por todo ello, la relación entre la radiancia y sus variables características vendrá dada por una relación **potencial**.

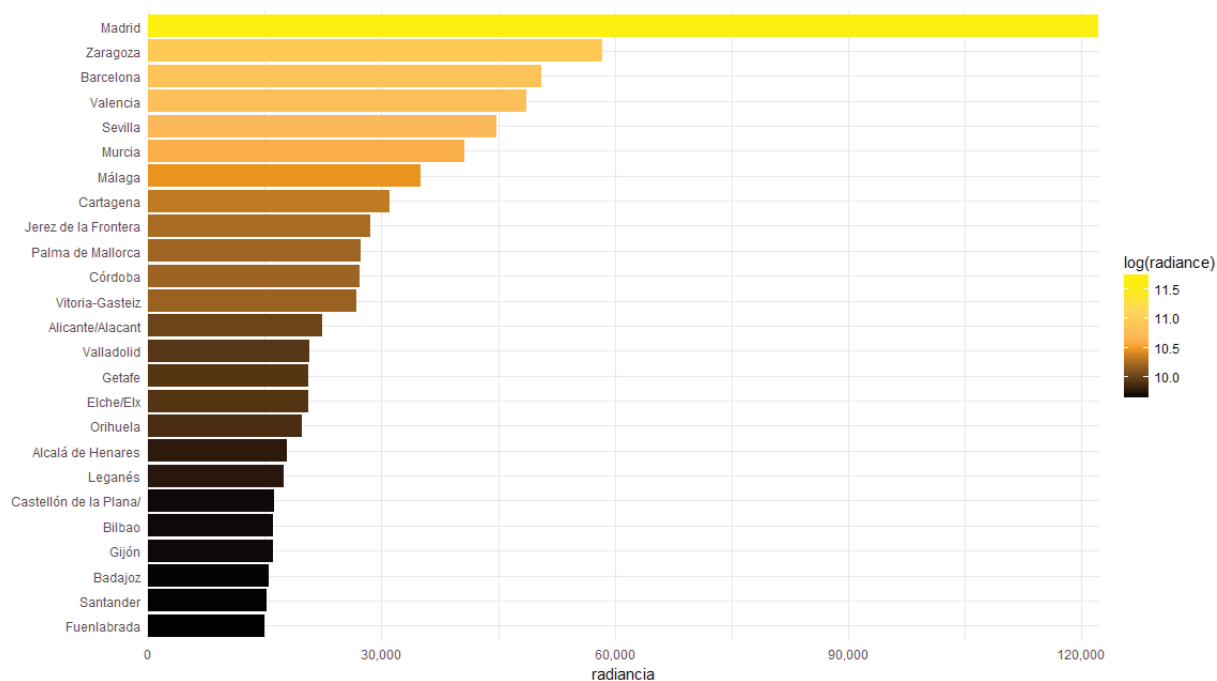
El modelo de regresión lineal doble logarítmico ofrece los siguientes resultados una vez despejados los logaritmos que de forma instrumental utilizamos para hacer lineal el problema:

$$\text{RAD} = 0,1194 * \text{POBLACION}^{0,3359} * \text{SUPERFICIE}^{0,2486} * \text{GASTO}^{0,1852} + \text{Error}$$

$$\text{Adj_Rsquared}^4 = 0,8993$$

Top-Ranking Radiancia, 2015

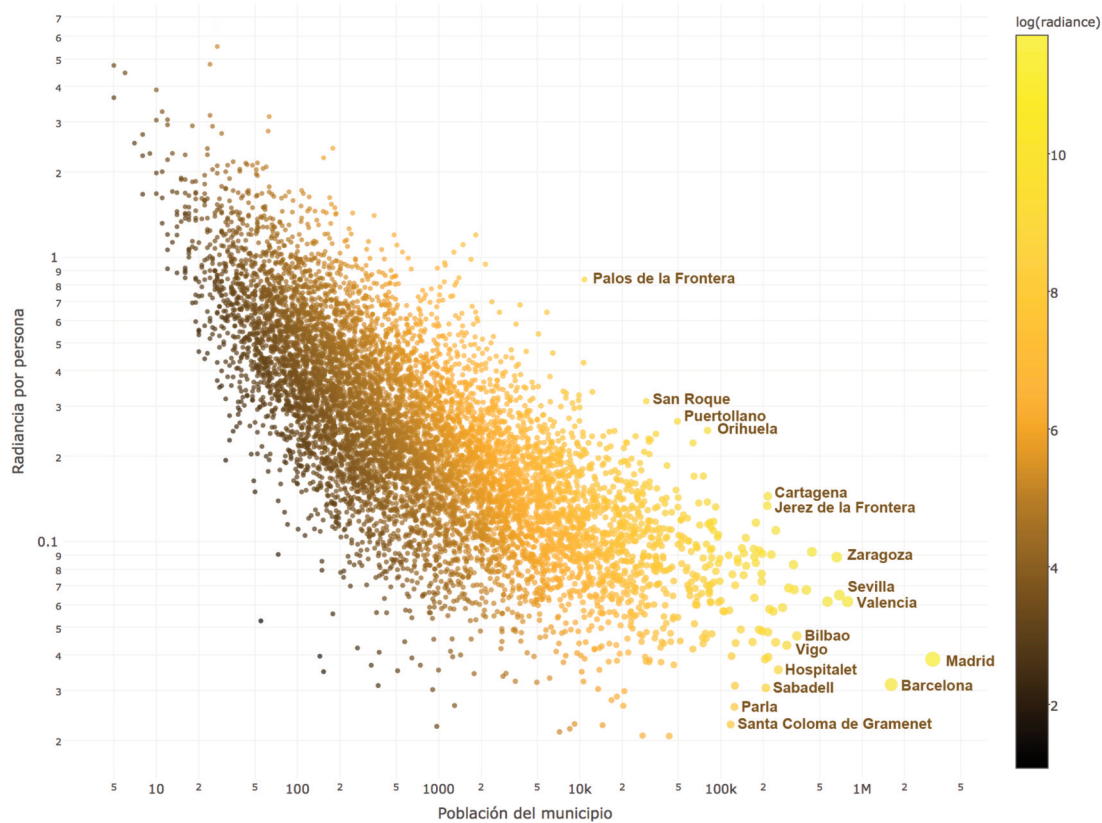
(escala logarítmica)



Fuente: elaboración propia a partir de IGN.

Radiancia per cápita por radiación agregada municipal

(escala doble logarítmica)



Fuente: elaboración propia a partir de INE, EUSTAT, SGCIYL y Google.

La población, la superficie urbana edificada y el propio gasto público en alumbrado en este orden de importancia caracterizan la radiancia emitida al espacio. La latitud o la longitud del municipio no muestran correlación significativa con la radiancia.

Explorando soluciones no lineales a través de técnicas de machine learning no se obtienen mejoras sensibles en la precisión del ajuste.

Una visualización del ajuste de nuestro modelo evidencia cierta heterocedasticidad⁵. Los municipios más pequeños en población presentan mayores desviaciones en el ajuste. La explicación física podría ser clara. La precisión del sensor en la captación de la radiancia desde el espacio pierde eficacia para superficies menores a los 500 m². Más del 75% de los municipios españoles tienen menos de 1.500 habitantes y una superficie urbana inferior a las 5 hectáreas, cabría pues *clusterizar*⁶ nuestro modelo y aplicar modelos ajustados a cada clúster.

Evidenciada la naturaleza no lineal de la radiancia con respecto al tamaño y población, cabría discutir cómo comparar la eficiencia entre dos municipios con tamaños y población diferentes. No podemos sacar conclusiones en una comparación basada en ra-

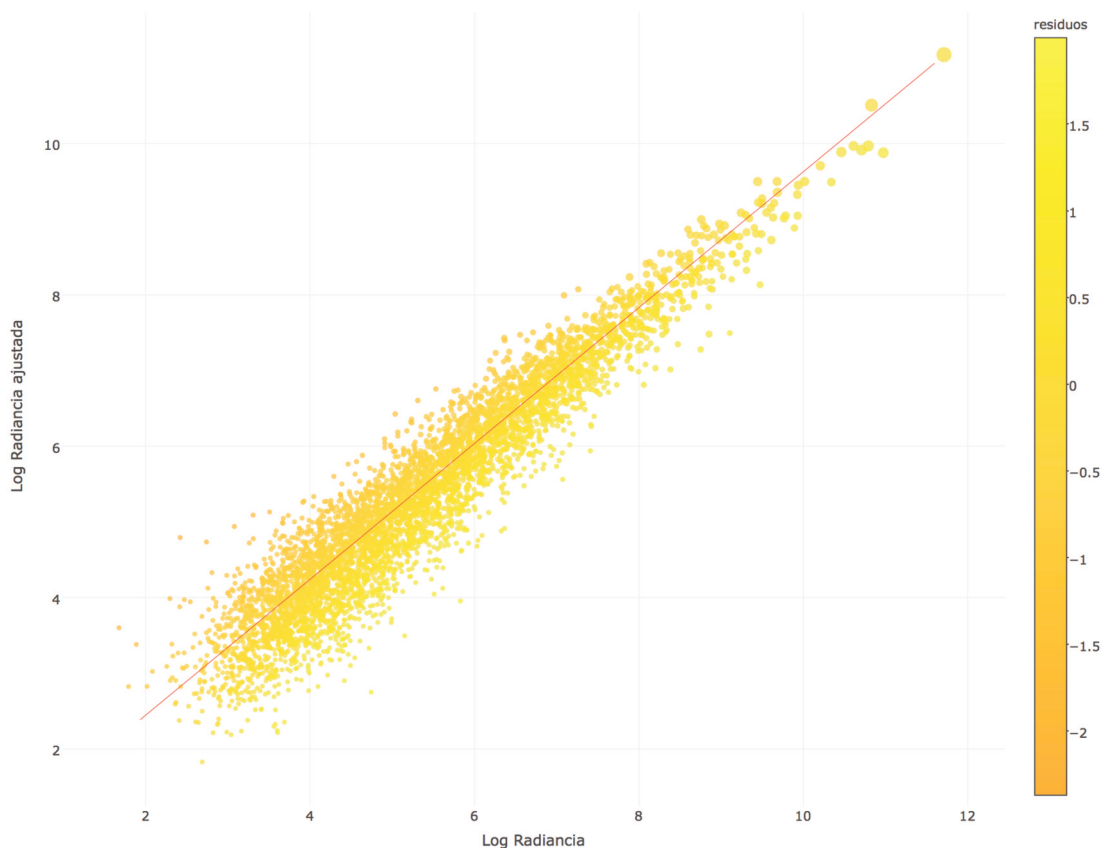
diancias per cápita del mismo modo que no pueden compararse púgiles de diferentes categorías. Por ello proponemos una medida que elimina el tamaño y permite su comparación: la distancia (**residuo**) entre la radiancia medida y su ajuste.

De manera simplificada, siendo el ajuste la dimensión que divide la muestra de observaciones en dos partes, la desviación positiva o negativa del valor real contra el teórico nos dará la comparación relativa entre municipios. Los municipios con residuos positivos, por encima de su valor teórico, serán más contaminantes que aquellos que se encuentren por debajo. Para que la comparación no quede contaminada a su vez por la heterocedasticidad esta propuesta debería aplicarse solo al clúster de municipios con más de 1.500 habitantes.

Observando el resultado, vemos como Barcelona tiene un residuo (distancia) menor con respecto a su valor teórico que la ciudad de Madrid, lo que la definiría como más eficiente de manera relativa con respecto a la capital de España. De forma general se pueden describir ciertos patrones. Los residuos positivos más extremos son testigo de los desarrollos urbanos más extensivos y por tanto menos sostenibles (mayor coste

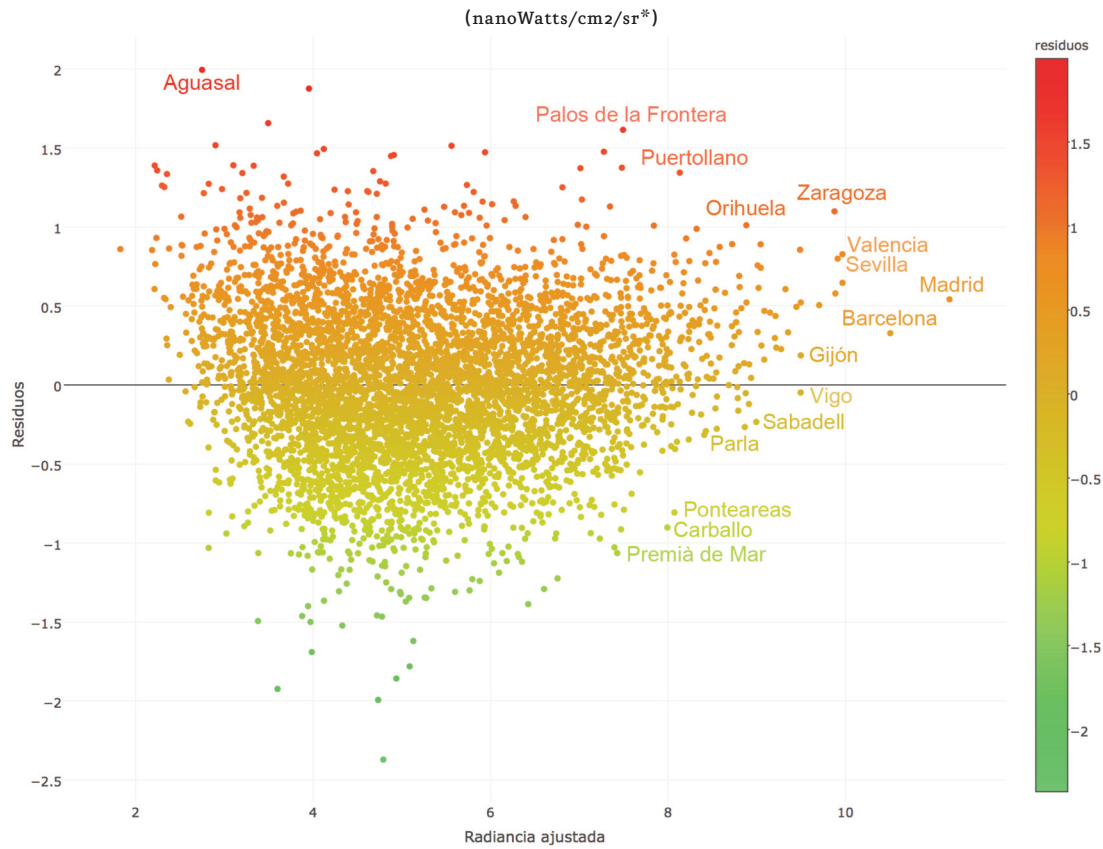
Radiancia ajustada vs radiancia por municipio

(escala doble logarítmica)



Fuente: elaboración propia a partir de INE, EUSTAT, SGCIYL y Google.

Distribución de residuos por radiancia ajustada



* Radiancia expresada en nanoWatts/cm2/sr, donde sr es el esteroradian, la medida del ángulo sólido y el nanoWatts son vatios como unidad de potencia multiplicados por 10×10^{-12} .
Fuente: elaboración propia a partir de INE, EUSTAT, SGCIYL y Google.

en gasto por alumbrado por persona). Habría un perfil de municipio costero, relacionado con el turismo y de grandes superficies urbanizadas (Marbella, Chicla de la Frontera) acompañado por otro perfil de municipio diferente, municipios con grandes infraestructuras o polígonos industriales (Puertollano, Dos Hermanas, Palos de la Frontera) señalado igualmente con los mayores residuos positivos.

Cabría revisar, de acuerdo a estos resultados, cómo mitigar la radiancia según el perfil desarrollado por el municipio (ejemplo: ¿si la actividad de un polígono industrial se reduce sensiblemente por la noche, cabría la posibilidad de disminuir la iluminación?) **Nuestros gobiernos municipales deberían tener en cuenta que la contaminación luminosa y su gasto correlacionado en alumbrado son sensibles a modelos de desarrollo urbano con baja densidad de población.**

Desde el punto de vista del ciudadano, este modelo puede servir para medir y distinguir las ciudades y pueblos que tienen una infraestructura de alumbrado más eficiente. Debemos ver siempre como un desperdicio y un uso inadecuado del alumbrado toda radiación que «escapa» hacia el espacio y así intentar su mitigación, aún a costa de privar de su maravilloso espectáculo a los astronautas que orbitan la Tierra y a futuros visitantes espaciales.

Como último apunte señalamos la reciente publicación⁷ en el mes de noviembre de un estudio que analiza la evolución de la radiancia emitida al espacio a nivel mundial durante los últimos cinco años, utilizando como fuente el mismo repositorio de la NOAA que hemos usado nosotros para el presente artículo. Las noticias no son buenas: **la contaminación lumínica a nivel mundial sigue aumentando ::**

Nota: este artículo es un extracto del trabajo de fin de curso del Máster en Data Science y Big Data 2017, Afi Escuela de Finanzas.

¹ National Oceanic and Atmospheric Administration.

² Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.

³ El gasto en alumbrado público que usamos para caracterizar la radiancia no contaba con datos publicados del año 2016 en el momento de la realización del trabajo.

⁴ El R^2 ajustado es una medida habitual y absoluta de precisión de un modelo de regresión, significando el tanto por ciento de variabilidad que explica el modelo.

⁵ La regresión lineal tiene como asunción la homocedasticidad, es decir, que el error (ruido) del modelo es aleatorio y no correlado con la propia variable objetivo.

⁶ La clusterización es una técnica de aprendizaje no supervisado que permite separar una muestra en función de diferentes algoritmos y medidas.

⁷ Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent, <http://advances.sciencemag.org/content/3/11/e1701528/tab-pdf>