

Estimación de trayectorias de crecimiento poblacional a partir de imágenes satelitales nocturnas DMSP-OLS en las cuatro principales ciudades de Colombia



PROJECTING POPULATION GROWTH FROM DMSP-OLS NIGHTTIME SATELLITE IMAGERY IN THE FOUR MAIN CITIES OF COLOMBIA

AVALIAÇÃO DE TRAJETÓRIAS DE CRESCIMENTO POPULACIONAL A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITES NOTURNOS DMSP-OLS NAS QUATRO PRINCIPAIS CIDADES DA COLÔMBIA

Diego Rodríguez-Mariaca¹
Francisco Luis Hernández-Torres²

Para citar este artículo: Rodríguez-Mariaca, D. y Hernández-Torres, F. L. (2019). Estimación de trayectorias de crecimiento poblacional a partir de imágenes satelitales nocturnas DMSP-OLS en las cuatro principales ciudades de Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 24(1), 35-52. <https://doi.org/10.19053/01233769.8087>



Recepción:

10 de junio de 2018

Evaluación:

6 de noviembre de 2018

Aprobación:

5 de febrero de 2019

Resumen

Las imágenes nocturnas se han empleado desde la década de los noventa y han permitido estudiar dinámicas de los asentamientos urbanos. Así mismo, la generación de censos poblacionales regularmente es un proceso costoso y, por ende, no pueden ser replicados constantemente. Por esta razón, se presenta como alternativa el uso de imágenes DMSP-OLS para determinar las trayectorias de crecimiento poblacional

- 1 Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías (GITTV). Laboratorio Urbano, Centro de Investigaciones y Documentación Socioeconómica (CIDSE). Universidad del Valle, Cali, Colombia. diego.rodriguez.mariaca@correounivalle.edu.co
- 2 Grupo de Investigación en Percepción Remota (GIPER). Universidad del Valle, Cali, Colombia. francisco.hernandez@correounivalle.edu.co

de las cuatro principales ciudades colombianas. Dichas trayectorias fueron estimadas a partir de los valores digitales de pixel de las imágenes antes y después de la calibración temporal, así como con los datos de la radiancia relativa. Las estimaciones de Cali y Barranquilla resultaron cercanas a las trayectorias de crecimiento poblacional proyectadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para el año 2005, por el contrario, los datos en Bogotá y Medellín presentaron distorsiones que sobreestimaron los tamaños poblacionales. Los hallazgos reafirman el potencial de dichas imágenes para monitorear las dinámicas poblacionales en Colombia.

Palabras clave: Colombia, desarrollo urbano, NTL, DMSP-OLS, proyección demográfica, teledetección.

Abstract

Nighttime imagery has been used since the 1990s and has enabled the study of urban settlement dynamics. Since population censuses are expensive and cannot be conducted regularly, DMSP-OLS imagery is introduced as an alternative to project population growth in the four main Colombian cities. These projections were made based on the digital pixel values of images before and after time calibration, as well as on relative radiance data. Cali and Barranquilla estimates are close to the population growth predicted by the National Administrative Department of Statistics (DANE) for 2005, while Bogotá and Medellín data show distortions that overestimated population sizes. Findings reaffirm the potential of these images to monitor population dynamics in Colombia.

Keywords: Colombia, urban development, NTL, DMSP-OLS, population projection, remote sensing.

Resumo

Imagens noturnas têm sido utilizadas desde a década dos anos noventa e tem permitido o estudo das dinâmicas dos assentamentos urbanos. Assim mesmo, a geração de censos populacionais regularmente é um processo caro e, portanto, não podem ser constantemente replicados. Por esse motivo, o uso de imagens DMSP-OLS é apresentado como uma alternativa para determinar as trajetórias de crescimento populacional das quatro principais cidades colombiana. Essas trajetórias foram estimadas a partir dos valores digitais de pixel das imagens antes e depois da calibração

temporária, bem como com os dados da radiância relativa. As estimativas de Cali e Barranquilla aproximaram-se as trajetórias de crescimento populacional projetadas pelo Departamento Administrativo Nacional de Estatística (DANE) para o ano 2005; pelo contrário, os dados em Bogotá e Medellín apresentaram distorções que superestimaram o tamanho da população. Os resultados reafirmam o potencial dessas imagens para monitorar as dinâmicas populacionais na Colômbia.

Palavras chave: Colômbia, Desenvolvimento Urbano, NTL, DMSP-OLS, Projeção Demográfica, Sensoriamento Remoto.

1. Introducción

Las imágenes nocturnas han sido objeto de estudio desde la década de los noventa, época desde la cual el Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Operational Linescan System (OLS)³ puso a disposición, de manera gratuita, imágenes anuales para el periodo 1992-2013, lo que ha permitido que sean usadas con múltiples propósitos; uno de ellos ha sido el estudio de las dinámicas socioeconómicas de los asentamientos urbanos. Los estudios desarrollados comprenden temas como urbanización, crecimiento económico y poblacional, acceso y consumo de electricidad, contaminación

lumínica y CO², entre otros, desarrollados principalmente en China, Estados Unidos, Medio Oriente y África subsahariana (Bennett y Smith, 2017).

Los trabajos referenciados en este estudio, debido a su alto rigor en el procesamiento de imágenes satelitales y temáticas demográficas o urbanas, se pueden clasificar mayoritariamente en dos tipos: 1) estudios empíricos que aportan al acervo literario y presentan evidencia sobre las relaciones entre la luminosidad de las ciudades (medida por medio de los valores digitales de pixel) y las actividades humanas (Doll y Pachauri, 2010; Huang, Yang, Li y Gao, 2016; Álvarez, Parés y Aide, 2012); y 2) estudios metodológicos en los cuales se relacionan aspectos teóricos soportados en formulaciones matemáticas robustas para la calibración temporal, la estimación de radiancia y la reducción de saturación del pixel (Elvidge, Hsu, Baugh, y Ghosh, 2014; Ma, Wu, Li, Peng y Liu, 2014; Hsu, Baugh, Ghosh, Zhizhin y Elvidge, 2015; Elvidge et al., 1999). Sin embargo, existe un pequeño grupo de estudios que combinan la rigurosidad de los métodos de percepción remota y la evidencia empírica de los análisis exploratorios y confirmatorios, lo

3 El programa DMSP-OLS hace parte de la agencia norteamericana de Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por su sigla en inglés). Si bien desde la década de los setenta se han realizado observaciones satelitales por parte de dicha entidad, fue solo hasta los noventa que los productos fueron puestos a disposición del público y se reconoció el potencial de estos para observar dinámicas urbanas. El programa publicó datos abiertos de las observaciones realizadas entre 1992-2013 que corresponden a la versión 4 y pueden ser consultados y descargados en <http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>. Debido a su reducida escala espacial y espectral, se suspendió dicho programa y se dio paso al programa NPP VIIRS DNB por medio de su sensor Suomi, del cual hay datos disponibles de mediciones desde el año 2012.

cual enriquece aún más la discusión en torno al uso de la teledetección en el seguimiento de las dinámicas urbanas, como el trabajo de Ju, Dronova, Ma y Zhang (2017).

La generación de estadísticas nacionales de datos poblacionales es, por lo regular, costosa. Si bien las encuestas de hogares logran captar información de múltiples dimensiones (sociales, culturales, económicas y demográficas, entre otras), estas no pueden ser replicadas constantemente (Martínez, 2006). Los censos en Colombia se realizan, aproximadamente, cada doce años. Durante este periodo de tiempo, se desarrollan dinámicas poblacionales que en ocasiones difieren de las proyecciones de crecimiento estimadas, como sucedió, por ejemplo, con las estimaciones en el censo del 1993 y los resultados del 2005, donde hubo una diferencia de cerca de tres millones de habitantes (Martínez, 2006), o como los hallazgos parciales del censo de 2018, donde se estima que la diferencia oscila en torno al 9%, es decir, 4,5 millones de habitantes menos que los proyectados en el 2005 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2018).

El uso de imágenes DMSP-OLS se presenta como alternativa para ajustar dichas proyecciones en Bogotá Distrito Capital y los municipios de Medellín, Cali y Barranquilla, que corresponden a los cuatro centros poblacionales más grandes de Colombia. En este conjunto no solo se encuentran las ciudades con mayor jerarquía poblacional (desde 1912) e industrial (desde 1951) (Latorre, 1986), sino que además estas presentan diferentes características físicas en cuanto a topografía, elevación, condiciones atmosféricas y dinámicas demográficas y económicas (Galvis, 2001, 2013; Vivas, 2011) que permiten captar parte de la diversidad regional y la heterogeneidad espacial del país.

En Colombia hay algunas aproximaciones con respecto a este tipo de estudios, donde es posible destacar el trabajo de Villa (2014), que emplea los valores digitales de imágenes NTL de DMSP-OLS como proxy anual del crecimiento del PIB municipal y per cápita, y su relación con la intervención estatal por medio de las políticas de transferencias monetarias condicionadas, empleando los registros de beneficiarios del Programa Familias en Acción entre el 2000 y 2004. Por otro lado, Higuera (2016) realiza un análisis específico del cambio en las condiciones económicas de la región del Pacífico colombiano después de los procesos de titulación colectiva de tierras. Aunque ambos estudios presentan un alto rigor en la formulación de hipótesis y métodos sofisticados de modelación, el procesamiento de las imágenes satelitales pasa desapercibido y se realizan comparaciones temporales sin llevar a cabo una calibración, por ende, suponen que un valor digital es comparable con otro de un año diferente y tomado por otro sensor, lo cual, ciertamente, no es adecuado, pues los valores digitales no son equivalentes temporal y espacialmente; el valor digital de luminosidad de un pixel captado por el sensor F10 no puede compararse directamente con el captado por el F15, pues los valores corresponden a fechas y sensores diferentes, razón por la cual debe realizarse el procesamiento de las imágenes primero para poder construir las series temporales (Elvidge et al., 1999, 2014; Ma et al., 2014; Hsu et al., 2015; Ju et al., 2017).

Es por lo anterior que el objetivo de este estudio es presentar una metodología simple en la cual se realiza el procesamiento mínimo de las imágenes para poder emplearlas como insumo y, por otro lado, un modelo demográfico de crecimiento poblacional sencillo, pues no contamos con los datos para estimar las tasas de crecimiento a partir de un modelo

más sofisticado, como el método de componentes empleado por el DANE. Por ello los esfuerzos de este trabajo apuntan en la dirección de los estudios empíricos con rigurosidad en el procesamiento de las imágenes, siguiendo principalmente la metodología empleada por Elvidge et al. (2014), que combina un componente analítico de las dinámicas urbanas como el expuesto por Huang et al. (2016).

Para la determinación de las trayectorias de crecimiento poblacional basadas en la luminosidad captada a través de las imágenes DMSP-OLS durante el periodo 1993-2005, se llevó a cabo el proceso de calibración temporal y se calculó la radiancia, posteriormente se estimó un modelo de crecimiento poblacional, y, a partir de este, se construyeron las trayectorias de crecimiento, que fueron comparadas con los datos generados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

2. Materiales y métodos

2.1. Imágenes NTL DMSP-OLS

Los datos corresponden a imágenes satelitales de luces nocturnas (en adelante, NTL, por la sigla en inglés de *night time lights*) de DMSP-OLS. Son datos de gran ayuda, pero presentan una serie de dificultades, pues han sido capturados durante el periodo de observación por cinco diferentes sensores (F10, F12, F14, F15 y F16) debido al desgaste de los mismos. Lo anterior conduce a que se deban hacer calibraciones interanuales para trabajar con los datos de forma continua. Adicionalmente, se presentan problemas relacionados con la saturación, el resplandor y la falta de calibración a bordo, lo cual implica que los datos deban ser procesados con una mayor rigurosidad para el análisis de las dinámicas de iluminación y brillo de las ciudades (Hsu et al., 2015).



FIGURA 1.

Imagen nocturna F15 de 2003.

Fuente: <http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>.

Las imágenes OLS versión 4 (Figura 1) consignadas en la página de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA) (<https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>) corresponden a imágenes compuestas por valores digitales que son una representación relativa de la radiancia de los objetos observados en el satélite. En este caso, dichos valores digitales se encuentran en un rango entre 0-63, debido a que el pixel solo almacena datos en 6 bits, además la resolución espacial de las imágenes es baja, ya que el tamaño del pixel es de 2,7 kilómetros. El rango espectral del sensor se encuentra entre los 0,4-1,1 μm , lo cual lo ubica entre el espectro visible y el infrarrojo cercano. La información captada de luminosidad nocturna de las ciudades oscila en la franja horaria de 20:30 a 21:30 h.

2.2. Censo y cartografía base

Se contó con los datos agregados a nivel municipal del censo de 1993 y de 2005 y las bases geográficas del Marco Geoestadístico Nacional (MGN) del DANE, que permitieron delimitar el área de cada municipio para, posteriormente, poder estimar los índices de luminosidad correspondientes a cada ciudad objeto de estudio.

2.3. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a los límites municipales de Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla. En la Figura 2 se presenta la ubicación y los niveles digitales de luminosidad de los cuatro municipios. Bogotá es la capital de Colombia y es la ciudad con mayor población del país, con más de 8 millones de habitantes. Está ubicada a $4^{\circ} 35' 56''$ N, $74^{\circ} 04' 51''$ W, con una altura media de 2.640 m s. n. m. y una superficie de 1.775 kilómetros cuadrados. Medellín es la segunda ciudad de Colombia con mayor cantidad de habitantes, cerca de 2,5 millones. Se encuentra ubicada entre cordilleras, a 1.495 m s. n. m., con una superficie de 382 kilómetros cuadrados a $6^{\circ} 14' 41''$ N, $75^{\circ} 34' 29''$ W.

Cali concentra 2,4 millones de habitantes y se localiza sobre un valle geográfico con una altura media de 1.018 m s. n. m. y un área aproximada de 619 kilómetros cuadrados, ubicado a $3^{\circ} 26' 24''$ N, $76^{\circ} 31' 11''$ W. Bogotá, Medellín y Cali se encuentran localizadas al interior del país. Por otro lado, Barranquilla se ubica en la costa Caribe, a $10^{\circ} 57' 50''$ N, $74^{\circ} 47' 47''$ W, sobre el extremo norte del país, a una altura de 18 m s. n. m. Alberga 1,2 millones de habitantes en 154 kilómetros cuadrados y es el municipio que menor extensión y altura presenta de los cuatro analizados.

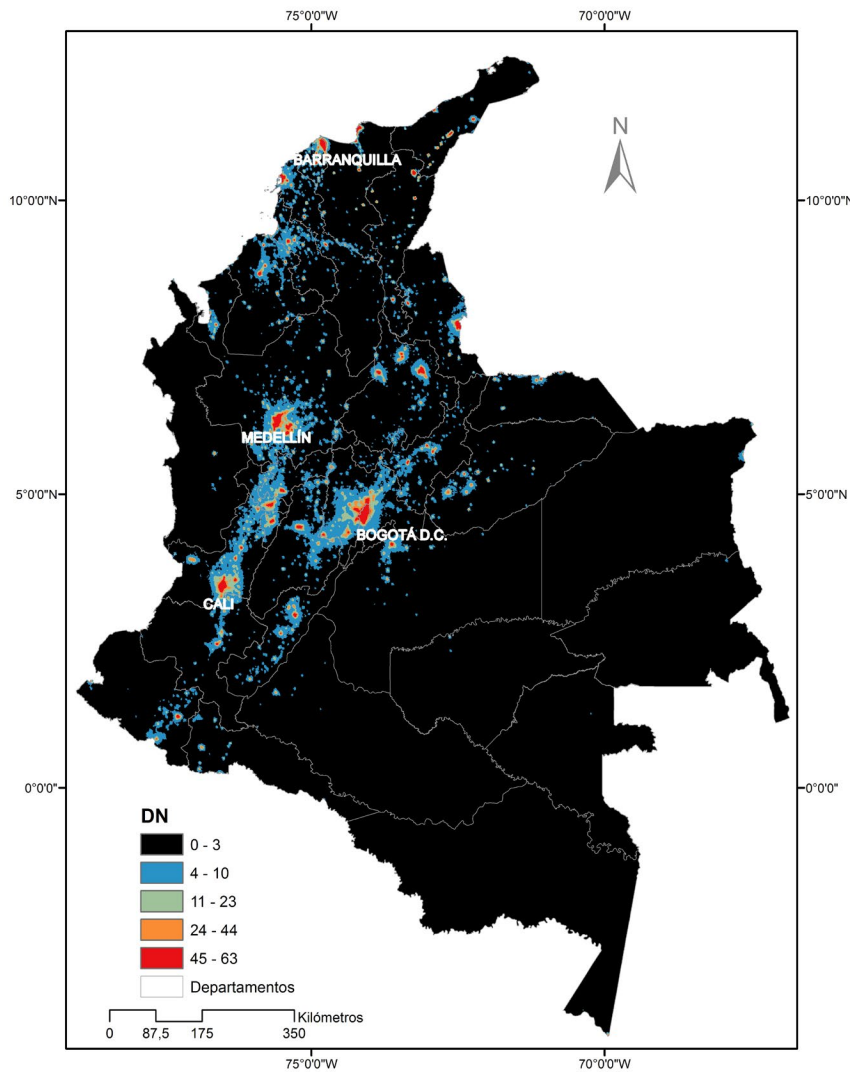


FIGURA 2.
 Luces nocturnas en la zona de estudio.
 Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes DMSP-OLS.

2.4. Estimación de SOL

Sum of lights (SOL, por su sigla en inglés) es un índice de luminosidad agregada que consiste en sumar los valores de los píxeles (DN_i) de la zona de estudio i (ecuación 1). Comúnmente se emplean los valores digitales de la imagen directamente (Doll y Pachauri, 2010; Huang et al., 2016; Álvarez et al., 2012); sin embargo, Elvidge et al. (2014) estiman el SOL después de calibrar la serie temporal.

$$SOL_i = \sum DN_i \quad (\text{Ec. 1})$$

Empleando la ecuación 1, se estimaron tres índices: *SOL DN*, que corresponde a la suma de los valores digitales de los píxeles contenidos en cada municipio; *SOL calibrado*, que hace referencia a la sumatoria de los valores digitales después del proceso de calibración; y *SOL radiancia*, que relaciona el proceso de calibración y estimación de radiancia para, posteriormente, realizar la sumatoria en cada municipio y así obtener la luminosidad en una unidad física y no en valores digitales, que corresponden a una escala relativa adimensional. Debido a distorsiones en los valores digitales de

algunas zonas de análisis en los años 1993 y 2005, fue necesario realizar las estimaciones de las tasas de crecimiento poblacional ampliando el horizonte a 1992-2006.

2.5. Calibración de la serie temporal

Siguiendo la metodología propuesta por Ju et al. (2017) y con los coeficientes de calibración consignados (Elvidge et al., 2014) que corresponden al resultado de la estimación de una regresión cuadrática (ecuación 2) entre los valores digitales de las imágenes anuales y la correspondiente a 1999, se estimó la serie calibrada 1992-2006.

$$DN'_i = \alpha_i \times L_i^2 + b_i \times L_i + C_i \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde DN'_i es el valor digital calibrado; a , b y c corresponden a los coeficientes de calibración y DN a los valores digitales originales de pixel. Para el periodo comprendido entre 1992 y 2006 hay disponibles 26 imágenes NTL, pues algunos años fueron capturados simultáneamente por dos satélites; sin embargo, para la construcción de la serie temporal fueron seleccionadas las imágenes anuales que, en su ajuste por medio de la ec. 2, tenían un R^2 mayor.

2.6. Estimación de radiancia

Debido a la falta de calibración interna y a que la construcción de las imágenes NTL se genera a partir de un compendio de capturas diarias, estas no tienen metadatos, lo cual implica que los términos de ganancia y sesgo, ampliamente usados en las imágenes satelitales, no puedan ser empleados de manera convencional en este caso. La estimación

de la radiancia se llevó a cabo por medio de la ecuación 3, la cual solo relaciona los valores digitales del pixel.

$$\text{Radiancia} = (DN)^{3/2} \times 10^{-10} \text{ W/cm}^2 \text{ /sr} / \mu \quad (\text{Ec. 3})$$

Cabe destacar que los valores estimados por medio de la ecuación 3 se deben interpretar como una radiancia relativa (Elvidge et al., 2014; 1999), ya que son un compendio anual de capturas, lo cual impide obtener factores de corrección.

2.7. Modelo de crecimiento poblacional

Con el propósito de modelar el crecimiento poblacional, y teniendo en cuenta la variación en la población registrada por el DANE, se empleó un modelo matemático de proyección demográfica (ecuación 4) que corresponde al geométrico de crecimiento periódico para estimar una tasa de crecimiento promedio. De igual manera, se emplearon las variaciones de SOL (DN, calibrado y radiancia).

$$\Delta P = (P_f / P_i)^{(1/n)} - 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde ΔP corresponde a la variación de la población, P_i es la población inicial, P_f la población final y n corresponde al número de periodos.

2.8. Estimación de trayectorias de crecimiento

A partir de las tasas de crecimiento promedio y los datos de población de cada municipio para el año de 1992, se empleó la ecuación 5 para estimar las

trayectorias de crecimiento poblacional DANE y SOL respectivamente.

$$P_t = P_i (\Delta P + I)^n \tag{Ec. 5}$$

Donde P_t es la población en el tiempo t , P_i es la población inicial, y ΔP corresponde a la variación de la población.

3. Resultados

Los resultados se enfocan, en primer lugar, en la comparación de las variaciones del SOL y posteriormente se confrontan las trayectorias de crecimiento poblacional estimadas a partir de las tasas

de crecimiento promedio de datos DANE y las variaciones del SOL.

3.1. SOL DN, calibrado y radiancia

En la Figura 3 se observa un ejemplo de las implicaciones al emplear los valores digitales, y la posible distorsión en los análisis temporales. El comportamiento de las variaciones del SOL para el municipio de Cali permite determinar la clara diferencia entre usar los valores digitales sin calibración y calibrados. También se evidencia una brecha de algunos años entre los valores de radiancia y los valores digitales calibrados, aun cuando su comportamiento es similar a lo largo del periodo de estudio.

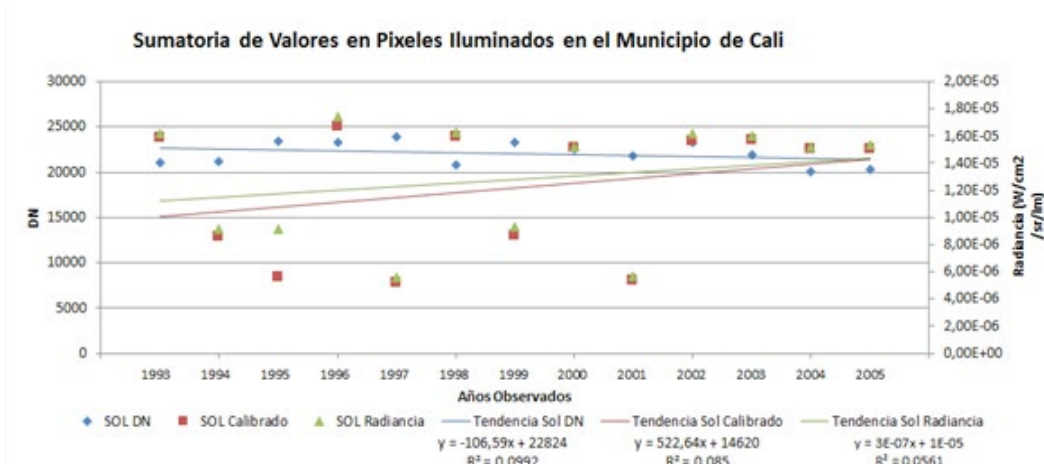
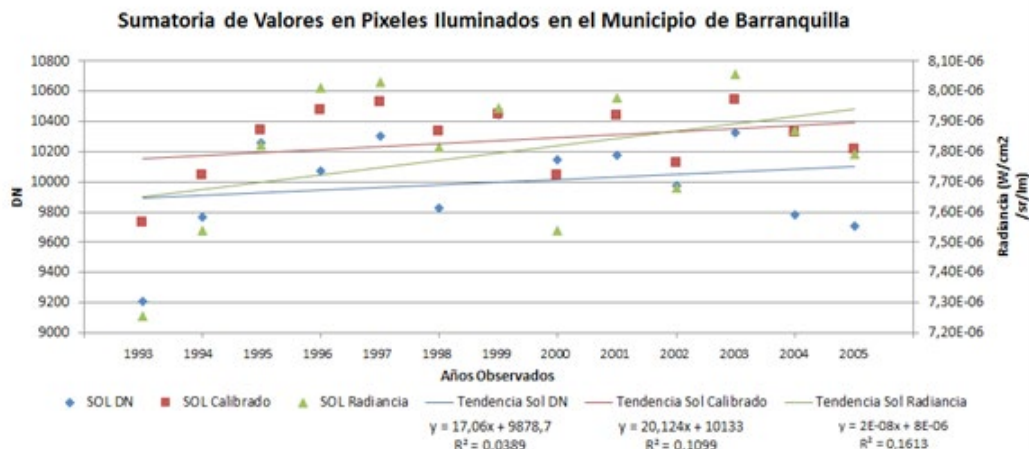


FIGURA 3. Comportamiento de SOL DN, SOL calibrado y SOL radiancia en Cali. Fuente: *Elaboración propia.*

Por otro lado, en la Figura 4 se presentan las tendencias para Barranquilla. De nuevo los valores digitales indican una fuerte diferencia comparados con los valores calibrados y de radiancia relativa. En los otros municipios estudiados dicho

comportamiento revela diferencias importantes, las cuales son evidentes en las tasas de crecimiento (Tabla 1) que se presentan y se analizan en detalle en el siguiente apartado.

**FIGURA 4.**

Tendencia SOL DN, SOL calibrado y SOL radiancia en Barranquilla.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Trayectorias de crecimiento poblacional

En cuanto a las tasas de crecimiento poblacional estimadas a partir de las variaciones de SOL y datos del DANE entre 1993 y 2005, encontramos cómo Barranquilla y Cali presentan valores, en términos de población estimada, cercanos a los datos obtenidos en la medición del censo de 2005. Cabe destacar el caso de Barranquilla, debido a que el error de la estimación por medio de NTL, con respecto a lo observado en el 2005, es menor que el de las proyecciones de 1993. Por otro lado, Bogotá y Medellín presentaron valores alejados y con fuertes distorsiones que sugieren que se debe considerar una mayor rigurosidad en el procesamiento de las imágenes, o que las diferencias físicas (topografía y elevación) podrían incidir sobre los resultados obtenidos.

Barranquilla, como se mencionó, fue el caso de mayor acierto, con tasas de crecimiento bajas y cercanas entre ellas: las variaciones de SOL (DN, calibrado y radiancia) y los datos DANE fueron de 0,0068, 0,0063, 0,0091 y 0,0055 respectivamente. La trayectoria de SOL radiancia presenta un mejor ajuste respecto a las mediciones del censo de 2005 que las proyecciones de 1993. Evidencia de lo anterior es la brecha entre la población del censo de 2005 con respecto a la estimada por medio del SOL radiancia y la proyección de 1993: mientras la primera es de 4.863 habitantes, la segunda fue de 33.482 habitantes. Como se puede observar en la Figura 5 y la Tabla 1 los resultados del SOL radiancia presentan una menor diferencia en la estimación del crecimiento poblacional.

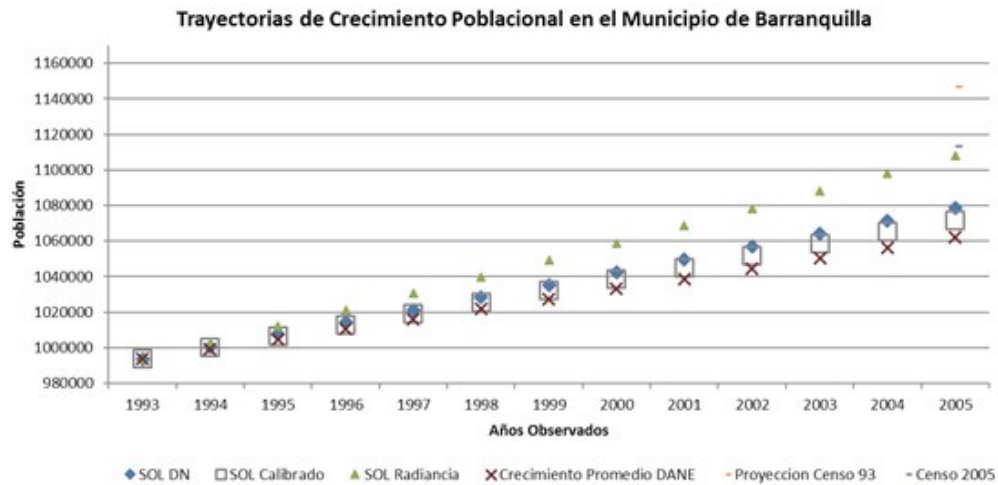


FIGURA 5.
 Trayectorias de crecimiento poblacional en Barranquilla.
 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 presenta las trayectorias de crecimiento poblacional en Cali: las tasas estimadas de las variaciones de SOL (DN, calibrado y radiancia) y de los datos del DANE son de 0,0053, 0,0083, 0,0086 y 0,0139 respectivamente. Es posible evidenciar que la brecha entre el SOL DN y los datos

del DANE es mayor que en las otras dos variaciones. Las trayectorias de crecimiento poblacional estimadas a partir de SOL calibrado y radiancia se encuentran más próximas, aunque no disminuye la brecha entre las proyecciones del DANE de 1993 y las mediciones del censo de 2005 (Tabla 1).



FIGURA 6.
 Trayectorias de crecimiento poblacional en Santiago de Cali.
 Fuente: Elaboración propia.

TABLA 1. DIFERENCIAS ENTRE LAS PROYECCIONES POBLACIONALES DEL CENSO DE 1993 Y LAS ESTIMADAS POR MEDIO DE NTL

	AÑO												Diferencia - Censo 2005	
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004		2005
Barranquilla														
DANE	993,76	999,29	1.004,84	1.010,43	1.016,05	1.021,70	1.027,39	1.033,10	1.038,84	1.044,62	1.050,43	1.056,27	1.062,15	-50,87
DN	1.000,59	1.007,47	1.014,39	1.021,36	1.028,38	1.035,45	1.042,57	1.049,73	1.056,95	1.064,21	1.071,53	1.078,89	1.086,25	-34,12
Calibrado	1.000,05	1.006,37	1.012,74	1.019,15	1.025,60	1.032,09	1.038,62	1.045,19	1.051,80	1.058,46	1.065,15	1.071,89	1.078,67	-41,12
Radiancia	1.002,82	1.011,97	1.021,20	1.030,51	1.039,91	1.049,40	1.058,97	1.068,63	1.078,38	1.088,21	1.098,14	1.108,15	1.118,25	-4,86
Cali														
DANE	1.666,47	1.689,64	1.713,14	1.736,96	1.761,11	1.785,60	1.810,43	1.835,61	1.861,13	1.887,01	1.913,25	1.939,86	1.966,83	-108,55
DN	1.675,35	1.684,28	1.693,26	1.702,28	1.711,36	1.720,48	1.729,65	1.738,87	1.748,14	1.757,46	1.766,82	1.776,24	1.785,71	-299,14
Calibrado	1.680,37	1.694,38	1.708,52	1.722,77	1.737,14	1.751,63	1.766,24	1.780,97	1.795,83	1.810,81	1.825,91	1.841,14	1.856,51	-234,24
Radiancia	1.680,96	1.695,58	1.710,33	1.725,20	1.740,21	1.755,34	1.770,61	1.786,00	1.801,54	1.817,21	1.833,01	1.848,95	1.864,95	-226,43
Bogotá														
DANE	6.778,69	6.912,12	7.048,18	7.186,91	7.328,38	7.472,63	7.619,72	7.769,71	7.922,65	8.078,59	8.237,61	8.399,76	8.565,10	1.786,41
DN	6.828,74	6.879,16	6.929,95	6.981,11	7.032,66	7.084,58	7.136,89	7.189,58	7.242,67	7.296,14	7.350,01	7.404,28	7.458,95	625,59
Calibrado	6.952,46	7.130,69	7.313,48	7.500,96	7.693,25	7.890,46	8.092,73	8.300,19	8.512,96	8.731,19	8.955,01	9.184,57	9.419,04	2.405,88
Radiancia	6.946,17	7.117,79	7.293,65	7.473,85	7.658,51	7.847,72	8.041,62	8.240,30	8.443,89	8.652,52	8.866,29	9.085,35	9.308,81	2.306,66
Medellin														
DANE	2.223,66	2.263,08	2.303,20	2.344,02	2.385,58	2.427,87	2.470,90	2.514,71	2.559,28	2.604,65	2.650,83	2.697,82	2.745,64	521,98
DN	2.231,61	2.239,58	2.247,59	2.255,62	2.263,68	2.271,77	2.279,89	2.288,04	2.296,21	2.304,42	2.312,66	2.320,92	2.329,21	97,26
Calibrado	2.757,05	3.418,39	4.238,37	5.255,04	6.515,57	8.078,48	10.016,28	12.418,90	15.397,85	19.091,37	23.670,85	29.348,83	37.125,17	27.125,17
Radiancia	2.841,03	3.629,81	4.637,59	5.925,16	7.570,21	9.671,99	12.357,31	15.788,17	20.171,57	25.771,97	32.927,25	42.069,12	53.845,46	39.845,46

Los valores se expresan en miles y corresponden a proyecciones poblacionales realizadas (número de habitantes). Estos hacen referencia a la variación poblacional (DN) estimada a partir de los valores digitales de NTL; calibrado: ajuste de los valores digitales de NTL por medio de la calibración; radiancia: conversión de los valores digitales de NTL calibrados en unidades físicas; DANE: tasas de crecimiento estimadas con base en las proyecciones del censo de 1993.

Con respecto a las tasas de crecimiento poblacional estimadas para Medellín a partir de la variación de SOL y datos del DANE, estas fueron de 0,0035, 0,2398, 0,2776 y 0,0177 respectivamente, lo cual sugiere que existe una sobreestimación en los resultados de SOL calibrado y radiancia con respecto a las cifras oficiales. Por otro lado, la tasa de crecimiento estimado a partir del SOL ND presenta una subestimación cercana a la tasa

de crecimiento estimada a partir de los datos del DANE.

En la Figura 7 se presentan las trayectorias de crecimiento poblacional en Medellín. Como se mencionó, existen amplias brechas entre las proyecciones del DANE para el censo de 1993, las mediciones del censo 2005 y las trayectorias estimadas a partir de la variación de SOL calibrado y SOL radiancia.

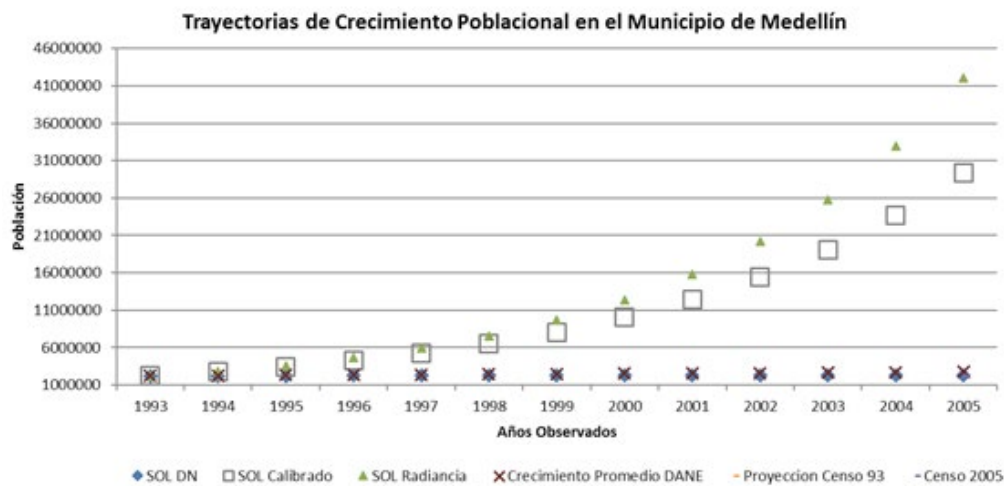


FIGURA 7. Trayectorias de crecimiento poblacional en Medellín. Fuente: *Elaboración propia.*

Las estimaciones de crecimiento poblacional para Bogotá presentan un patrón similar al de Medellín. Las tasas obtenidas a partir de las variaciones de SOL (DN, calibrado y radiancia) y DANE para el municipio corresponden

a 0,0073, 0,0256, 0,02470 y 0,0196 respectivamente. Sin embargo, la brecha entre las trayectorias de crecimiento poblacional estimadas a partir de SOL radiancia y DANE es menor que la de Medellín (Figura 8).

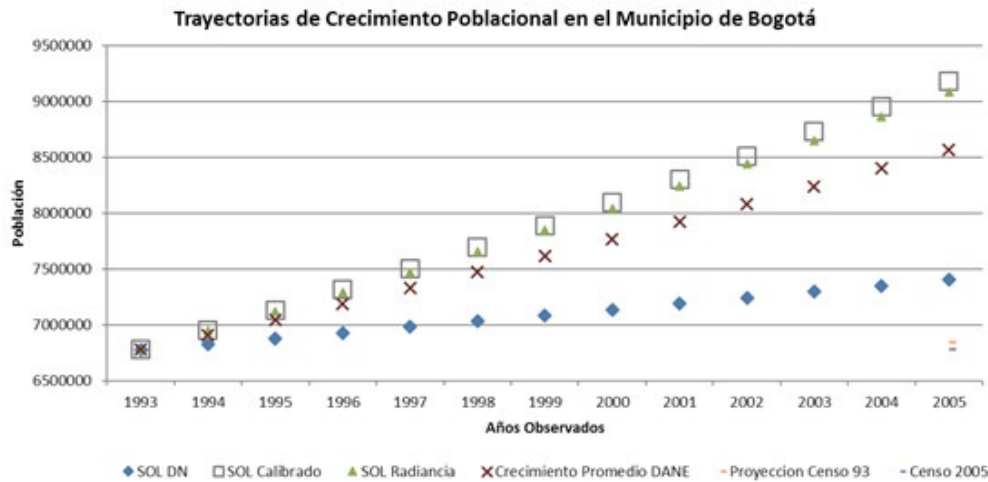


FIGURA 8.
 Trayectorias de crecimiento poblacional en Bogotá.
 Fuente: *Elaboración propia.*

Finalmente, vale la pena exponer que los hallazgos encontrados en este estudio sugieren un comportamiento atípico en dos de las cuatro ciudades, pues la calibración y la conversión a magnitudes físicas redujo la diferencia entre los valores de población estimados por medio de las NTL respecto a los observados en el censo 2005. Sin embargo, en las otras dos ciudades esto generó un aumento en dichas diferencias. Los resultados sugieren que, a excepción de Cali, en las otras tres ciudades la estimación del crecimiento poblacional por medio de NTL en valores digitales logró reducir la diferencia entre lo proyectado a partir del censo de 1993 y lo observado en el 2005.

4. Discusión

Las diferencias encontradas en las estimaciones para cada municipio son el mayor aporte del estudio, pues son pocos los trabajos realizados en Colombia con este tipo de imágenes. Además, la

comparación de los resultados obtenidos a partir de la estimación del índice SOL, en el cual se introdujo una variación de acuerdo al nivel de procesamiento de los píxeles, permitió identificar los diferenciales en los resultados que se obtienen, de acuerdo a la rigurosidad de las correcciones realizadas a las imágenes satelitales.

Como se expuso en el capítulo de resultados, las trayectorias de crecimiento estimadas para Bogotá y Medellín presentan una sobreestimación de las tasas de crecimiento con respecto a las proyectadas en 1993 y las observadas en el 2005; sin embargo, Medellín las supera ampliamente, lo cual puede ser objeto de futuros estudios.

En el caso de Cali y Barranquilla, las estimaciones presentan un patrón de subestimación en las trayectorias de crecimiento poblacional. Esto reafirma lo expuesto por Huang et al. (2016), pues en su estudio cada ciudad presenta patrones de crecimiento distintos y en este caso, aun cuando

Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla son los cuatro municipios con mayor población en el país, sus dinámicas demográficas son diferentes.

Elvidge et al. (2014) destaca en su estudio que Colombia es un país con una baja relación entre la población y la luminosidad, sin embargo, esta es consistente según las mediciones realizadas por los sensores para las ciudades estudiadas. Lo anterior puede deberse a que el crecimiento poblacional y el desarrollo urbano en el país presenta tasas relativamente bajas⁴ en comparación con países asiáticos y del Medio Oriente, donde el desarrollo urbano ha sido acelerado en las últimas décadas, por lo cual se deben introducir ciertas consideraciones acerca de las trayectorias de desarrollo territorial en el país.

5. Conclusiones

Como principal conclusión, se presentan hallazgos acerca de la posibilidad de realizar una aproximación de población empleando imágenes NTL de DMSP-OLS en Colombia; sin embargo se sugiere, para futuras investigaciones, refinar las estimaciones empleando métodos más sofisticados para la determinación de las tasas de crecimiento⁵. Adicionalmente, la reducción de problemas de saturación de pixel podría mejorar los resultados, así como estimar coeficientes de calibración que se ajusten mejor a las condiciones del país.

Se presenta evidencia acerca del uso inadecuado de los valores digitales en las imágenes NTL DMSP-OLS sin calibración sobre la serie, por lo cual se destaca la necesidad de realizarla para poder estimar variaciones temporales, como lo mencionan Elvidge et al. (2014). A pesar de lo anterior, los resultados apuntan a que el uso de datos NTL sin calibración se ajustan de manera aproximada en todas las ciudades a la población proyectada; sin embargo, la calibración y conversión a magnitudes físicas de los valores digitales permite reducir la brecha entre la población estimada por medio de proyecciones y del censo.

El estudio de los cambios en la configuración urbana, el crecimiento poblacional y económico del país empleando imágenes nocturnas tiene una trayectoria limitada, pues entre los estudios empíricos conocidos por los autores tan solo tres tienen como zona de estudio Colombia (Álvarez et al., 2012; Villa, 2014; Higuera, 2016). De estos, tan solo el de Álvarez et al. (2012) realiza un análisis de uso del suelo, mientras que en los otros dos se emplea la luminosidad como una variable proxy de jerarquía poblacional; sin embargo, no hacen parte del acervo de estudios urbanos.

Cabe destacar que, en el caso de Colombia, no todo el territorio presenta desarrollos urbanos y los existentes están concentrados principalmente en la zona central del país. Como se observa en la Figura 2, son pocos los centros poblados que alcanzan niveles altos de luminosidad, por lo cual es necesario desarrollar estudios más rigurosos de teledetección acerca del comportamiento de las luces nocturnas en el país y su relación con las actividades humanas.

4 Las tasas de crecimiento poblacional entre 1992 y 2009 estimadas por Álvarez et al. (2012) corresponden al 1,9 para el global y 2,2 en zonas urbanas. En cuanto a la tasa de crecimiento mundial entre el 2000 y 2010, según Angel, Parent, Civco, Blei y Potere (2011), es de 2,02; por debajo de estos valores se encuentran los países ricos y desarrollados, y Latinoamérica y el Caribe. En la misma línea, Linard, Tatem y Gilbert (2013) presentan que las tasas de crecimiento de los países del continente africano son las más altas.

5 Como combinar con métodos de componentes de migración, tasas de natalidad y mortalidad, entre otros, por medio de modelos de simulación dinámica que integren elementos demográficos y urbanos.

Por otro lado, los hallazgos indican que la saturación de píxeles en zonas urbanas de los municipios con mayor desarrollo urbano genera distorsiones sobre las mediciones. Debido a esto las estimaciones realizadas en Barranquilla fueron acertadas, lo cual sugiere que en los municipios intermedios, con población entre 100.000 y 1.000.000 habitantes y densidades relativamente bajas, el monitoreo y el estudio de las trayectorias de crecimiento poblacional puede ser una alternativa viable de ajuste para las proyecciones poblacionales.

Potenciar la investigación y el uso de sensores remotos como alternativa de seguimiento y proyección de los cambios en las actividades humanas, que genere una integración de áreas del conocimiento interesadas en este tipo de estudios, permitirá desarrollar trabajos más robustos en el procesamiento adecuado de las imágenes satelitales y con metodologías sofisticadas que se emplean con mayor rigurosidad en los procesos de modelación y simulación de escenarios.

La posibilidad de realizar futuras investigaciones empleando los datos del satélite Suomi NPP, el cual tiene una resolución espacial de 742 metros, espectral de 12 bits y con calibración abordo,

se debe destacar, pues aunque no cuente con los datos históricos del DMSP-OLS presenta ventajas importantes en la estimación de estructuras urbanas en países en desarrollo como Colombia, con urbes que empiezan su tránsito hacia ciudades policéntricas o donde se empiezan a configurar áreas metropolitanas que generan una alteración en el ordenamiento del territorio y las actividades de sus habitantes.

Agradecimientos

Los autores agradecen los valiosos comentarios de Harvy Vivas y Héctor Fabio Ramírez, así como el apoyo de Sebastián Vinasco, integrante de GIPER, y John Hernández, del Laboratorio Urbano, en los procesos de formulación y estimación. Especial agradecimiento a Valentina Restrepo y Jorge Gallego por la revisión y los comentarios a las versiones preliminares del artículo. De igual manera, a los evaluadores anónimos designados por el comité editorial de la revista, por sus recomendaciones y anotaciones. Finalmente, a Wladimir Mejía y Alejandra Castro, gracias por su valiosa y gentil colaboración.



Referencias

- Álvarez-Berrios, N. L., Parés-Ramos, I. K. y Aide, T. M. (2012). Contrasting patterns of urban expansion in Colombia, Ecuador, Peru, and Bolivia between 1992 and 2009. *Ambio*, 42(1), 29-40.
- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A. y Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Progress in Planning*, 75(2), 53-107.
- Bennett, M. M. y Smith, L. C. (2017). Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 192, 176-197.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018) Resultados preliminares del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) 2018, segunda entrega preliminar. Recuperado de <http://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-2da-entrega.pdf>
- Doll, C. N. y Pachauri, S. (2010). Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery. *Energy Policy*, 38(10), 5661-5670.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Dietz, J. B., Bland, T., Sutton, P. C. y Kroehl, H. W. (1999). Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment*, 68(1), 77-88.
- Elvidge, C. D., Hsu, F.-C., Baugh, K. E. y Ghosh, T. (2014). National trends in satellite-observed lighting: 1992-2012. En Weng, Q. (ed.), *Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation* (pp. 97-118). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Galvis Aponte, L. A. (2001). *La topografía económica de Colombia*. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional y Urbana, n° 22. Cartagena: Banco de la República.
- Galvis A., L. A. (2013). *Dinámica de crecimiento económico y demográfico regional en Colombia, 1985-2011*. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional y Urbana, n° 186. Cartagena: Banco de la República.
- Higuera-Mendieta, I. (2016). *Persistencias históricas y discontinuidades espaciales: territorios comunitarios en el Pacífico colombiano*. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional y Urbana, n° 239. Cartagena: Banco de la República.
- Hsu, F. C., Baugh, K. E., Ghosh, T., Zhizhin, M. y Elvidge, C. D. (2015). DMSP-OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration. *Remote Sensing*, 7(2), 1855-1876.
- Huang, Q., Yang, Y., Li, Y. y Gao, B. (2016). A simulation study on the urban population of China based on nighttime light data acquired from DMSP/OLS. *Sustainability*, 8(6), 521. <https://doi.org/10.3390/su8060521>
- Ju, Y., Dronova, I., Ma, Q. y Zhang, X. (2017). Analysis of urbanization dynamics in

- mainland China using pixel-based night-time light trajectories from 1992 to 2013. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 6047-6072.
- Latorre, E. (1986). *Transporte y crecimiento regional en Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Linard, C., Tatem, A. J. y Gilbert, M. (2013). Modelling spatial patterns of urban growth in Africa. *Applied Geography*, 44, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.009>
- Ma, L., Wu, J., Li, W., Peng, J. y Liu, H. (2014). Evaluating saturation correction methods for DMSP/OLS nighttime light data: A case study from China's cities. *Remote Sensing*, 6(10), 9853-9872. doi:10.3390/rs6109853.
- Martínez, J. (2006) ¿Para qué sirven las cifras del censo? *Negocio Inteligente: el Sentido Real de la Tecnología*, 21, 30-1.
- Villa, J. M. (2014). *Social transfers and growth: The missing evidence from luminosity data*. Wider Working Paper nº 2014/090. Recuperado de <https://www.wider.unu.edu/sites/default/files/wp2014-090.pdf>
- Vivas, H. (2011). El desarrollo en 3D: las claves de las diferencias en la calidad de vida de las regiones. *Revista de Ciencias Sociales*, 7, 197-224. <https://doi.org/10.18046/recs.i7.1042>

