

**Estimación de Trayectorias de Crecimiento Poblacional a Partir de Imágenes Satelitales Nocturnas DMSP-OLS en las cuatro principales ciudades de Colombia.**

Estimation of Population Growth Trajectories from Night Time Light DMSP-OLS in the four main cities of Colombia.

Estimativa do Crescimento Populacional Trajetórias das Imagens de Satélite Noturno DMSP-OLS nas 4 principais cidades da Colômbia.

Diego Alejandro Rodríguez Mariaca<sup>1</sup>

Francisco Luis Hernández Torres<sup>2</sup>

Para citar este artículo: Rodríguez Mariaca, D.A y Hernández Torres, L. F. (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). 10.19053/01233769.8087

**Resumen**

Las imágenes nocturnas se han empleado desde la década de los 90, permitiendo estudiar dinámicas de asentamientos urbanos. La generación de censos poblacionales regularmente es un proceso costoso, 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 de las cuatro principales ciudades colombianas. Dichas trayectorias fueron estimadas a partir de los valores digitales de píxel 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 DANE para el año 2005, por el contrario, los datos en Bogotá y Medellín presentaron distorsiones que sobreestimaron los tamaños poblacionales. Los

---

<sup>1</sup> diego.rodriguez.mariaca@correounivalle.edu.co

<sup>2</sup> francisco.hernandez@correounivalle.edu.co

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**

The Night Time Light have been used since the 90s, allowing the study of urban settlement dynamics. The generation of population censuses regularly is a costly process, therefore they can not be replicated constantly. For this reason, the use of DMSP-OLS images is presented as an alternative to determine the trajectories of population growth in the four main Colombian cities. Said trajectories were estimated from the digital pixel values of the images before and after the temporary calibration, as well as with the relative radiance data. Cali and Barranquilla estimates were close to the trajectories of population growth projected by the DANE for the year 2005, on the contrary, the data in Bogotá and Medellín presented distortions that overestimated the population sizes. The findings reaffirm the potential of these images to monitor population dynamics in Colombia.

**Key words:** Colombia, Urban development, NTL, DMSP-OLS, Demographic projection, Remote sensing.

### **Resumo**

As imagens noturnas vêm sendo utilizadas desde a década de 90, permitindo o estudo da dinâmica dos assentamentos urbanos. A geração de censos populacionais regularmente é um processo dispendioso, portanto eles não podem ser replicados constantemente. Por esta razão, o uso de imagens DMSP-OLS é apresentado como uma alternativa para determinar as trajetórias de crescimento populacional nas quatro principais cidades colombianas. As referidas trajetórias foram estimadas a partir dos valores de pixel digital das imagens antes e após a calibração temporária, bem como com os dados relativos de radiância. As estimativas de Cali e Barranquilla estavam perto as trajetórias de crescimento da população projetada pelo DANE para 2005, no entanto, os dados apresentados em Bogotá e Medellín distorções superestimados tamanhos populacionais. Os resultados reafirmam o potencial dessas imagens para monitorar a dinâmica populacional na Colômbia.

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

En diagramación

## 1 Introducción

Las imágenes nocturnas han sido objeto de estudio desde la década de los 90, época desde la cual el Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa - Sistema Operacional Linescan (DMSP-OLS)<sup>3</sup> 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 CO<sup>2</sup>, entre otros, desarrollados principalmente en China, Estados Unidos, Medio Oriente y África Subsahariana (Bennett y Smith, 2017).

Los trabajos conocidos por los autores y 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 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 et al., 2016; Álvarez, Parés y Aide, 2012). 2) Estudios metodológicos en los cuales se relacionan aspectos teóricos soportados en formulaciones matemáticas robustas para la calibración temporal, estimación de radiancia y reducción de saturación del píxel (Elvidge et al., 2014; Ma et al., 2014; Hsu et al., 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 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 et al. (2017).

---

<sup>3</sup> El programa DMSP-OLS hace parte de la agencia norte americana de Administración Nacional Oceánica Atmosférica, NOAA por sus siglas en inglés. Si bien desde la década de los 70 se han realizado observaciones satelitales por parte de dicha entidad, fue solo hasta los 90 en 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.

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, demográficas, entre otras) de estos y los individuos que lo componen, estas no pueden ser replicadas constantemente (Martínez, 2006). Los censos en Colombia se realizan, aproximadamente, cada 12 años. Durante este periodo de tiempo se desarrollan dinámicas poblacionales que en ocasiones difieren de las proyecciones de crecimiento estimadas, como por ejemplo sucedió con las estimadas en el censo del 1993 y los resultados del 2005, donde hubo una diferencia de cerca de 3 millones de habitantes (Martínez, 2006) o como los hallazgos parciales del Censo de 2018 donde la diferencia se estima oscila el 9%, es decir 4,5 millones de habitantes menos que los proyectados en el 2005 (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 corresponde 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 como su topografía, elevación, condiciones atmosféricas y dinámicas demográficas y económicas (Galvis, 2001, 2013; Vivas, 2011) que permiten captar parte de la diversidad regional y heterogeneidad espacial del país.

En Colombia hay algunas aproximaciones con respecto a este tipo de estudios, 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, 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 lo cual 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 combinan 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 sus siglas en inglés) de DMSP-OLS. Son datos de gran ayuda, pero presentan una serie de

dificultades pues han sido capturados durante el periodo de observación por 5 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, resplandor y falta de calibración abordo, 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).

Las imágenes OLS versión 4 (Figura 1) consignados 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  $\mu\text{m}$  ubicándolo entre el espectro visible y el infrarrojo cercano. La información de luminosidad nocturna de las ciudades captada oscila en la franja horaria de 20: 30 a 21: 30 h.



*Figura 1 Imagen Nocturna F15 2003*

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

## **2.2 Censo y cartografía base**

Se contó con los datos agregados a nivel municipal de Censo de 1993 y 2005, y las bases geográficas del Marco Geoestadístico Nacional MGN 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 4 municipios. Bogotá es la capital de Colombia, siendo esta la ciudad con mayor población del país, con más de 8 millones de habitantes, ubicado a  $4^{\circ}35'56''\text{N}$ ,  $74^{\circ}04'51''\text{W}$  con una altura media de 2640 m.s.n.m. y una superficie de 1.775 kilómetros cuadrados. Medellín, es la segunda ciudad de Colombia con mayor cantidad de habitantes con cerca de 2,5 millones. Esta se encuentra ubicada entre cordilleras, a 1.495 m.s.n.m con una superficie de 382 kilómetros cuadrados, a  $6^{\circ}14'41''\text{N}$ ,  $75^{\circ}34'29''\text{W}$ .

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  $3^{\circ}26'24''\text{N}$ ,  $76^{\circ}31'11''\text{W}$ . Bogotá, Medellín y Cali se encuentran localizados al interior del país. Por otro lado, Barranquilla se ubica en la costa caribe, a  $10^{\circ}57'50''\text{N}$ ,  $74^{\circ}47'47''\text{W}$ , 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, siendo el municipio que menor extensión y altura presenta de los cuatro analizados.



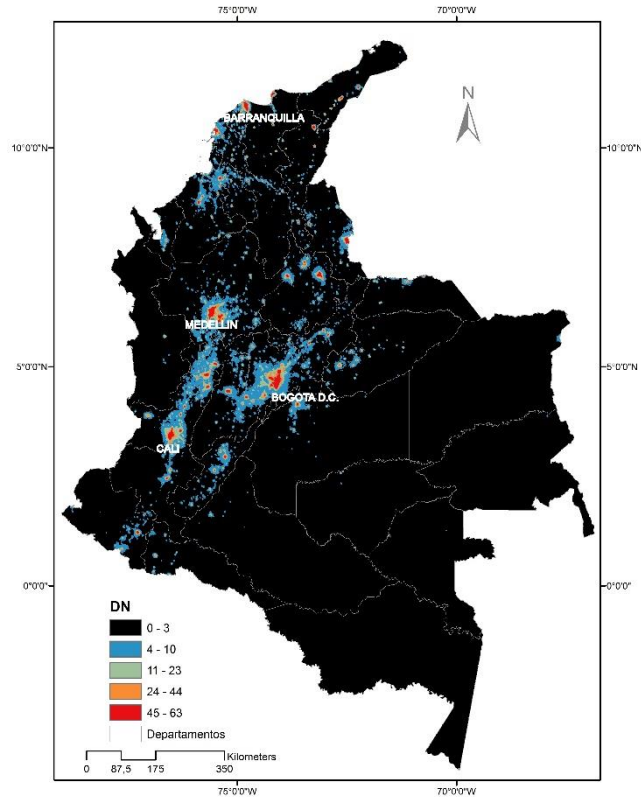


Fig. 2 Luces Nocturnas en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes DMSP-OLS

## 2.4 Estimación de SOL

El SOL o “Sum-Of-Lights” por sus siglas 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, Parés y Aide, 2012) sin embargo, Elvidge et al., (2014) estima el SOL después de calibrar la serie temporal.

$$SOL_i = \sum DN_i \quad (1)$$

Empleando la Ecuación 1 se estimaron 3 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 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.

$$DN'_i = a_i \times L_i^2 + b_i \times L_i + c_i \quad (2)$$

Donde,  $DN'_i$  es el valor digital calibrado; a, b y c corresponde 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 2 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 píxel.

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

Cabe resaltar que los valores estimados por medio de la Ecuación 3 se deben interpretar como una radiancia relativa (Elvidge et al.2014; Elvidge et al., 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).

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

Donde  $\Delta P$  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.

$$P_t = P_i(\Delta P + 1)^n \quad (5)$$

Donde  $P_t$  es la población en el tiempo  $t$ ,  $P_i$  es la población inicial, y  $\Delta P$  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 realiza 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 en algunos años entre los valores de radiancia y valores digitales calibrados, aun cuando su comportamiento es similar a lo largo del periodo de estudio.

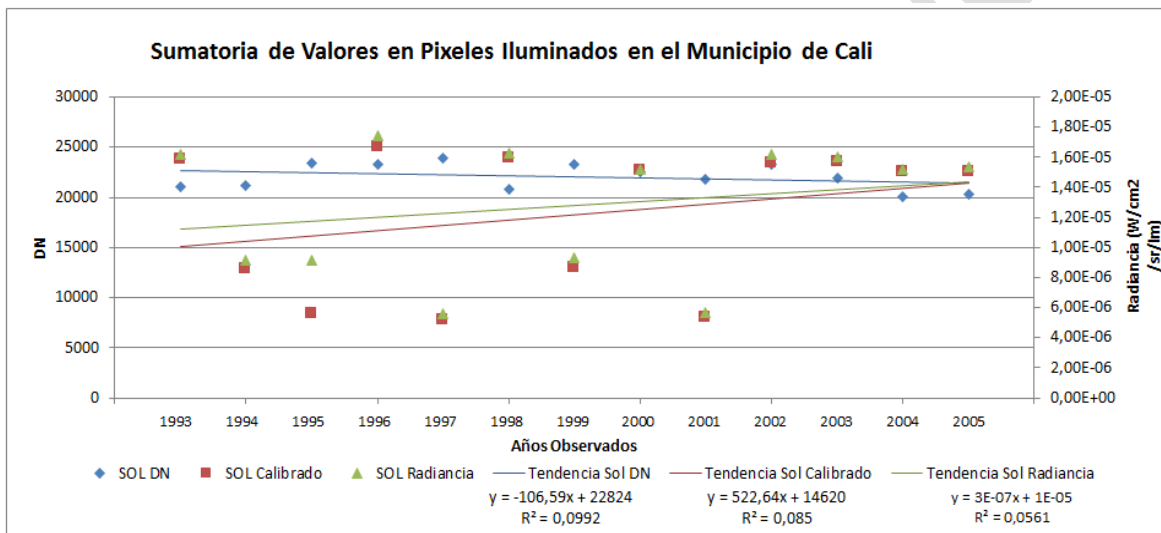


Figura. 3 Comportamiento de SOL DN, SOL Calibrado y SOL Radiancia en Cali

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 analizan en detalle en el siguiente apartado.

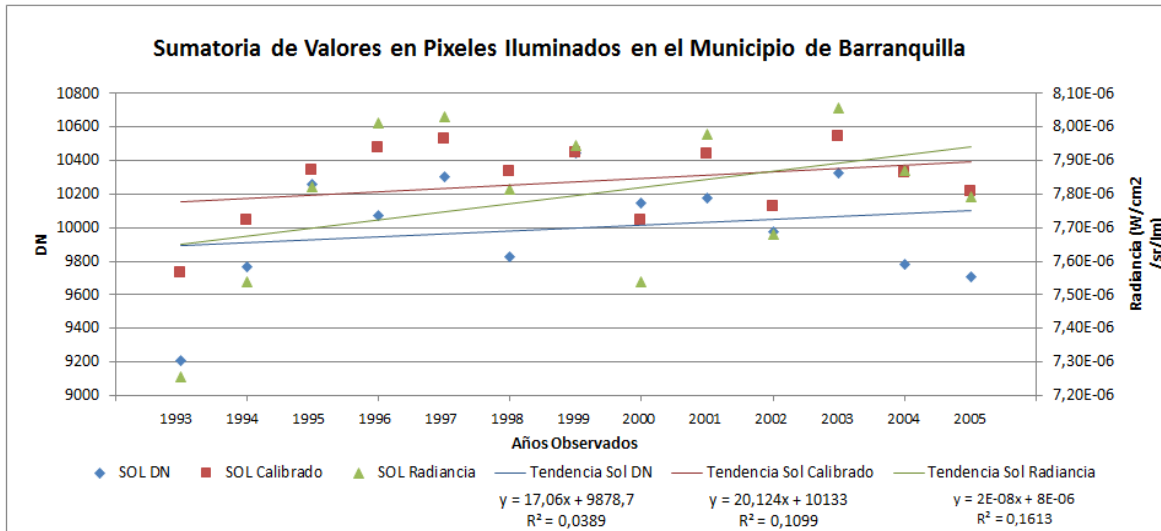


Fig. 4 Tendencia SOL DN, SOL Calibrado y SOL Radiancia en Barranquilla

### 3.2 Trayectorias de Crecimiento Poblacional

En cuanto a las tasas de crecimiento poblacional estimadas a partir de las variaciones de SOL y datos DANE entre 1993 y 2005, a la luz de los resultados, 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 anteriormente, fue el caso de mayor acierto con tasas de crecimiento bajas y cercanas entre ellas, siendo las variaciones de SOL (DN, Calibrado y Radiancia) y datos DANE 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 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 Tabla 1 los resultados del SOL Radiancia presentan una menor diferencia en la estimación del crecimiento poblacional.

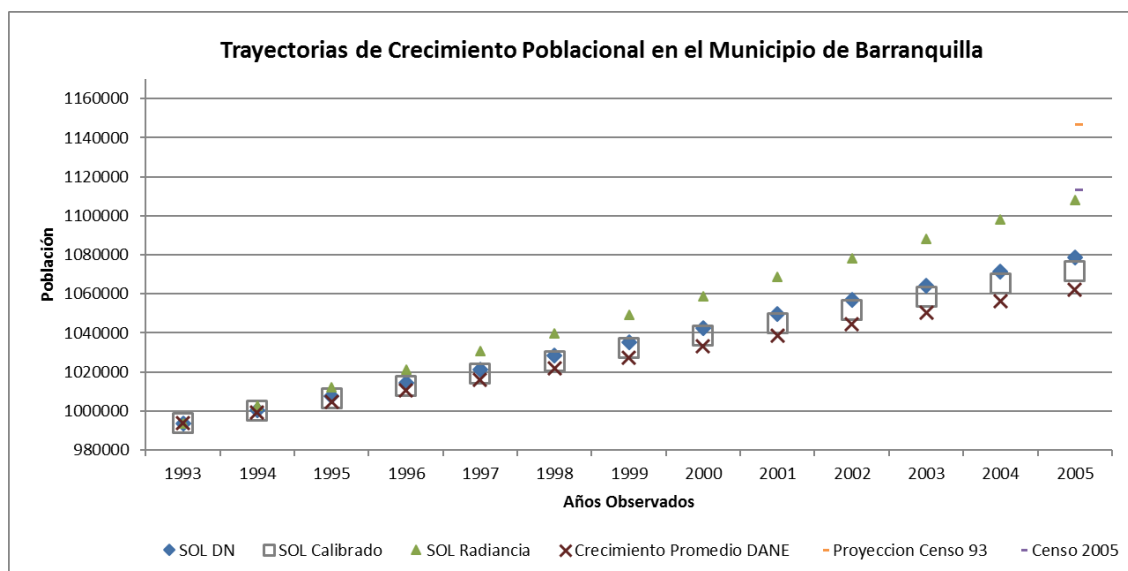


Fig. 5 Trayectorias de Crecimiento Poblacional en Barranquilla.

La Figura 6 presenta las trayectorias de crecimiento poblacional en Cali, las tasas estimadas de las variaciones de SOL (DN, Calibrado y Radiancia) y datos 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 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 DANE de 1993 y las mediciones del Censo 2005 (Tabla 1).

Tabla 1 Diferencias entre las proyecciones poblacionales del CENSO 1993 y las estimadas por medio de NTL

	AÑO											Diferencia -		
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003		2004	2005
<b>Barranquilla</b>														
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	1.078,89	-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	1.071,89	-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	1.108,15	-4,86
<b>Cali</b>														
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	1.776,24	-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	1.841,14	-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	1.848,95	-226,43
<b>Bogotá</b>														
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	7.404,28	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	9.184,57	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	9.085,35	2.306,66
<b>Medellín</b>														
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	2.320,92	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	29.348,83	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	42.069,12	39.845,46

Los valores se expresan en miles y corresponde 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) al ajuste de los valores digitales de NTL por medio de la calibración; (Radiancia) a la conversión de los valores digitales de NTL calibrados en unidades físicas; (DANE) a las tasas de crecimiento estimadas con base en las proyecciones del Censo de 1993.

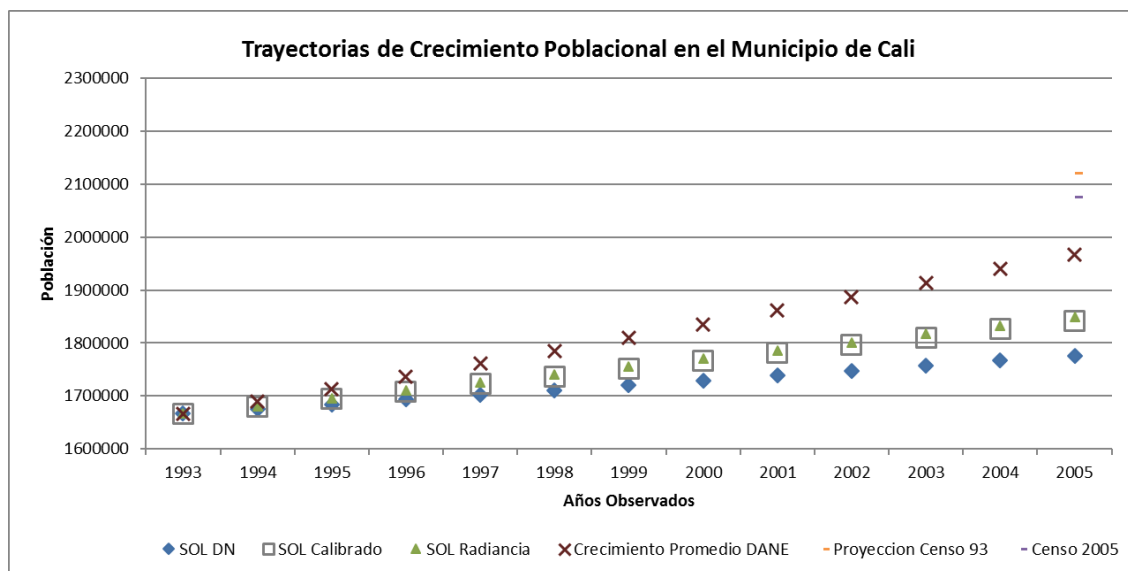
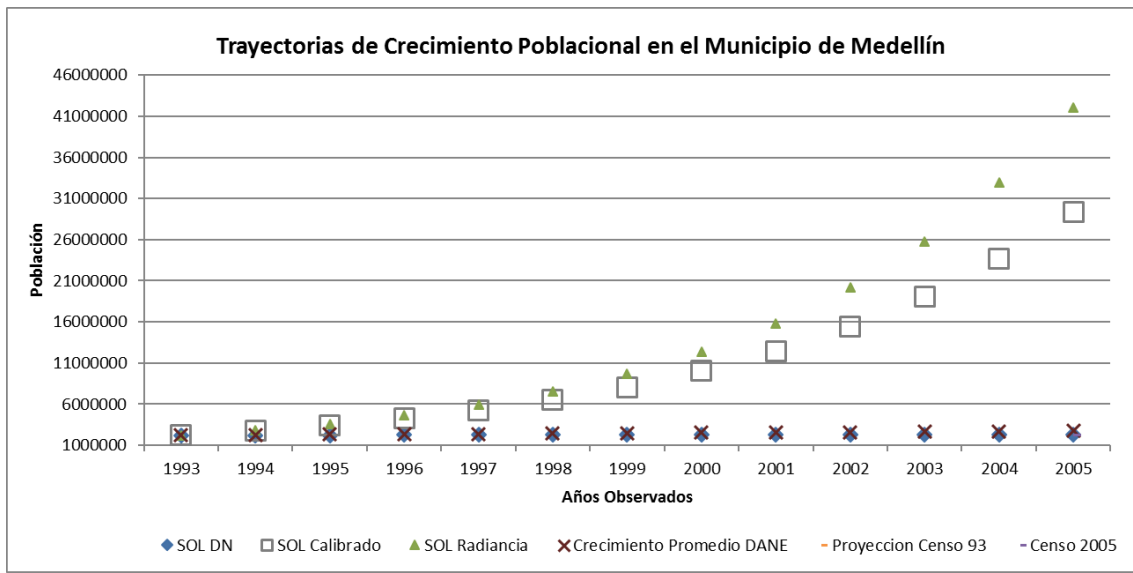


Fig. 6 Trayectorias de Crecimiento Poblacional en Santiago de Cali

Con respecto a las tasas de crecimiento poblacional estimadas para Medellín, a partir de la variación de SOL y datos 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 DANE.

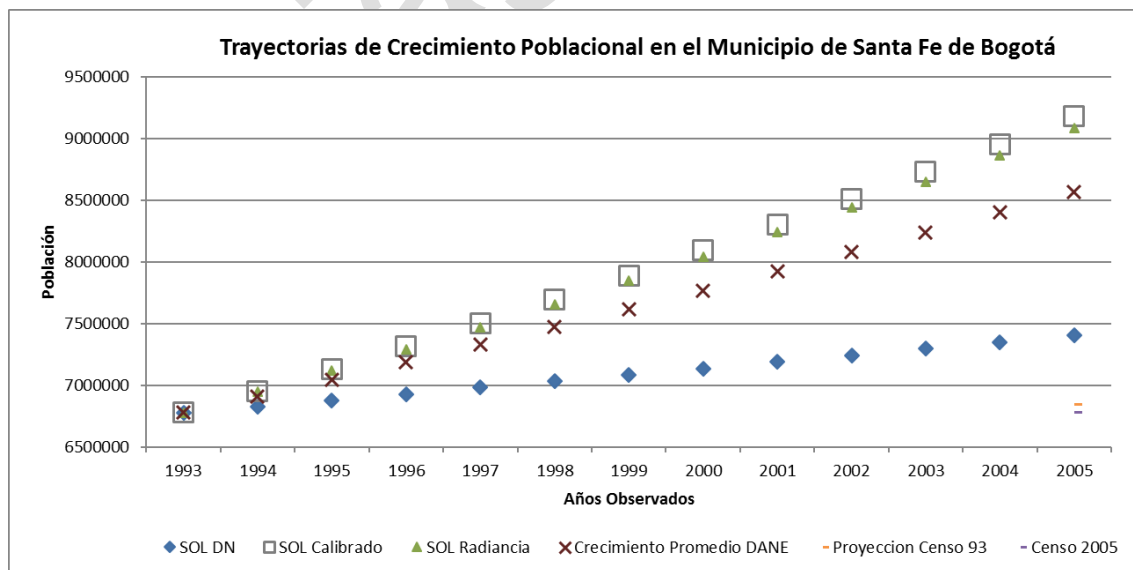
En la Figura 7 se presentan las trayectorias de crecimiento poblacional en Medellín, como se mencionó anteriormente, existen amplias brechas entre las proyecciones DANE del censo de 1993, las mediciones del Censo 2005 y las trayectorias estimadas a partir de la variación de SOL Calibrado y SOL Radiancia.





*Fig. 7 Trayectorias de Crecimiento Poblacional en Medellín.*

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, 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).



*Fig. 8 Trayectorias de Crecimiento Poblacional en Bogotá.*

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 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 3 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 es 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 observadas en el 2005, sin embargo Medellín supera estas 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, en este caso, aun cuando Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla son los 4 municipios de mayor población en el país, sus dinámicas demográficas son diferentes.

Elvidge et al. (2014) resalta 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 bajas<sup>4</sup> 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 tasas de crecimiento<sup>5</sup>. Adicionalmente, podría mejorar los resultados la reducción de problemas de saturación de pixel, 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 resalta 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 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

---

<sup>4</sup> Las tasas de crecimiento poblacional entre 1992 y 2009 estimadas por Álvarez, Parés y Aide (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 et al. (2010) es de 2,02; encontrándose por debajo de estos valores los países ricos y desarrollados, y Latinoamérica y el Caribe. En la misma línea Linard, Tatem y Gilbert (2013) presentan como las tasas de crecimiento de los países del continente africano son las más altas.

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

Colombia (Álvarez, Parés y Aide, 2012; Villa 2014; Higuera, 2016). Y de estos tan solo el de Álvarez, Parés y Aide (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 resaltar 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.

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, esto sugiere que en los municipios intermedios, con población entre 100.000 y 1.000.000 habitantes y densidades relativamente bajas, el monitoreo y 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 investigación 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 resaltar, pues aunque no cuente con los datos históricos del DMSP-OLS, presenta ventajas importantes en la estimación de estructura urbana en países en desarrollo

como Colombia con ciudades que empiezan su tránsito hacia ciudades policéntricas o donde se empiezan a configurar áreas metropolitanas, generando una alteración en el ordenamiento del territorio y las actividades de sus habitantes.

## Referencias

- Álvarez-Berrios, N. L., Parés-Ramos, I. K., & Aide, T. M. (2012). Contrasting patterns of urban expansion in Colombia, Ecuador, Peru, and Bolivia between 1992 and 2009. *Ambio*, 42(1), 29-40.3.
- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A., & 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., & 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.
- DANE (2018) Resultados preliminares del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) 2018, segunda entrega preliminar. Consultado 13 de Noviembre de 2018 <http://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-2da-entrega.pdf>
- Doll, C. N., & Pachauri, S. (2010). Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery. *Energy Policy*, 38(10), 5661-5670.2.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Dietz, J. B., Bland, T., Sutton, P. C., & Kroehl, H. W. (1999). Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment*, 68(1), 77-88.2.
- Elvidge, C. D., Hsu, F.-C., Baugh, K. E., & Ghosh, T. (2014). National trends in satellite-observed lighting. *Global urban monitoring and assessment through earth observation*, 23, 97-118.

- Galvis Aponte, L. A. (2001). La topografía económica de Colombia. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, N° 19, Banco de la Republica, Cartagena.
- Galvis A., L. A. (2013). Dinámica de crecimiento económico y demográfico regional en Colombia, 1985-2011. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, N° 186, Banco de la Republica, Cartagena.
- Higuera-Mendieta, I. (2016). Persistencias históricas y discontinuidades espaciales: territorios comunitarios en el Pacífico colombiano Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, N° 239, Banco de la Republica, Cartagena.
- Hsu, F. C., Baugh, K. E., Ghosh, T., Zhizhin, M., & 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., & Gao, B. (2016). A simulation study on the urban population of China based on nighttime light data acquired from DMSP/OLS. *Sustainability*, 8(6), 521.2.
- Ju, Y., Dronova, I., Ma, Q., & 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*, 1-262.
- Latorre, E. (1986). Transporte y crecimiento regional en Colombia (No. HE116 L35).
- Linard, C., Tatem, A. J., & 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., & 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. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/6d54/9a2064771fb1a63103d66d2bf01237ab2b6a.pdf>
- Martínez J. (2006) ¿Para qué sirven las cifras del censo? *Negocio inteligente: el sentido real de la tecnología*. 21. 30-1. ISSN 1794 – 3388 2.

Villa, J. M. (2014). Social transfers and growth: The missing evidence from luminosity data (No. 2014/090). WIDER Working Paper. 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>

En diagramación