

## Metodología para evaluar la contaminación lumínica causada por el alumbrado público en la ciudad de Cuenca

*Raúl M. Quito A.<sup>1</sup>, Marco V. Guanuquiza L.<sup>1</sup>, Juan L. Espinoza A.<sup>2</sup>, Giovanni S. Pulla G.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Obras y Proyectos Flores e Hijo Cia. Ltda, Cuenca, Ecuador, 01.01.04.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 01.01.168.

<sup>3</sup> Departamento de Alumbrado Público, Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR, Cuenca, Ecuador, 01.01.168.

Autor para correspondencia: raul.quitoa@ucuenca.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

### RESUMEN

La contaminación o contaminación lumínica es un concepto relativamente reciente que viene despertando el interés de científicos y reguladores a nivel mundial. El principal objetivo de este trabajo es presentar un resumen de la metodología orientada al análisis de la contaminación lumínica provocada por el sistema de alumbrado público en la ciudad de Cuenca - Ecuador, así como los principales resultados obtenidos al desarrollar dicha metodología. Para lograr este objetivo, se realizó un levantamiento de información en campo, mediante el medidor de calidad del cielo (SQM-LU-DL), y de esta manera estar en la condición de presentar un mapa zonal de contaminación lumínica, que permita contar con un registro de la evolución de la misma en la ciudad. Con la información levantada, también se estableció una escala para representar la contaminación lumínica en ciudades. Sin embargo, dadas las diferentes condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones, tanto los mapas como la escala deberán ser analizados y contrastados en próximos trabajos de investigación. Se trabajó con diferentes factores que intervienen en la contaminación lumínica, entre ellos la nubosidad, temperatura y humedad, particularmente se pudo notar una correlación directa de este último factor con el aumento o reducción de los niveles medidos de contaminación lumínica.

Palabras clave: Contaminación lumínica, medidor de calidad de cielo, metodología.

### ABSTRACT

Light pollution is a relatively recent concept that has awakened the interest of scientists and regulators worldwide. The main objective of this paper is to present a methodology enabling the analysis of light pollution caused by street lighting, and to test it on the lighting system of Cuenca city (Ecuador). To achieve this objective a field research was conducted using the Sky Quality Meter (SQM-LU-DL). Measurements enabled the development of a zonal map of light pollution and the delineation of a light pollution scale. Given the different conditions under which the measurements were conducted, it is most likely that the map and the scale ought to be refined in future studies.

Keywords: Light pollution, sky quality meter, methodology.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de contaminación lumínica se lleva a cabo en la ciudad de Cuenca ubicada al sur del Ecuador, capital de la provincia del Azuay, que se encuentra a 2550 msnm y posee un clima templado. Cuenta con una población urbana de 331,888 habitantes y tiene una superficie de 70,59 km<sup>2</sup> (INEGI, 2010).

Para la zonificación de la ciudad se utilizaron el método de la cuadrícula y de viales (Guanuquiza & Quito, 2014), con lo que se pudo localizar los puntos de medición que cubran toda la ciudad.

Se puede decir que contaminación lumínica es la alteración del medio nocturno del cielo y lugares aledaños por la emisión del flujo luminoso de fuentes artificiales en cantidades y direcciones que no cumplen con su propósito de iluminar las zonas previstas (Falchi *et al.*, 2011). En ese sentido, la contaminación lumínica que produce el alumbrado público se debe principalmente a la mala posición de las luminarias, el reflejo que produce la calzada y las fachadas de las casas. Hoy en día, la contaminación lumínica, siendo un concepto relativamente reciente, ha despertado el interés de científicos y entidades reguladoras a nivel mundial.

Además de los problemas sobre ciertas especies de plantas y animales nocturnos, entre los efectos negativos más importantes de la polución lumínica hacia las personas están las molestias por “encandilamiento” y la dificultad o imposibilidad de ver los cielos nocturnos (Falchi *et al.*, 2011).

En cuanto a normativa sobre polución lumínica, la organización Dark - Sky Association (IDA, 2007) empezó a preocuparse y estar en defensa de los cielos nocturnos. Ecuador publicó recientemente el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público”, donde se incluye una sección dedicada a la polución lumínica. A nivel internacional la Comisión Internacional de Iluminación CIE ha desarrollado las siguientes publicaciones sobre polución lumínica:

- Publicación CIE 126-1997: “Directrices para la minimización del brillo del cielo”.
- Publicación de la CIE 150-2003: “Guía para la limitación de los efectos molestos de la luz procedente de las instalaciones de iluminación en exteriores”.

Así también países como España tiene normativa desarrollada en varios ayuntamientos autónomos, mientras que en Sudamérica, Chile y Colombia son de los pocos países en aprobar leyes y reglamentos al respecto.

El principal objetivo de este trabajo es presentar una metodología orientada al análisis de la polución lumínica provocada por el sistema de alumbrado público en una ciudad andina del Ecuador, así como los principales resultados al aplicar dicha metodología.

## 2. MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1. Metodología

La metodología propuesta para evaluar la polución lumínica en la ciudad se puede resumir en: recopilación de información, zonificación, uso de programas computacionales, procedimiento para las mediciones, creación de una base de datos de resultados, validación y análisis (ver Fig. 1).

En primera instancia se recomienda contar con un protocolo para una recopilación ordenada de información, previo al inicio del trabajo de medición. En cada una de las mediciones se llena una hoja de datos con variables que intervienen en las mediciones entre las más representativas están: contaminación atmosférica, humedad, nubosidad y temperatura, debido a la reflexión que la luz pueda tener hacia el cielo, ya sea en partículas de polvo o de agua.

Para la ciudad de Cuenca luego del proceso de medición se llegó a la conclusión que se necesitan 25 estaciones de medición a una distancia aproximada de 1,5 km (Guanuquiza & Quito, 2014).

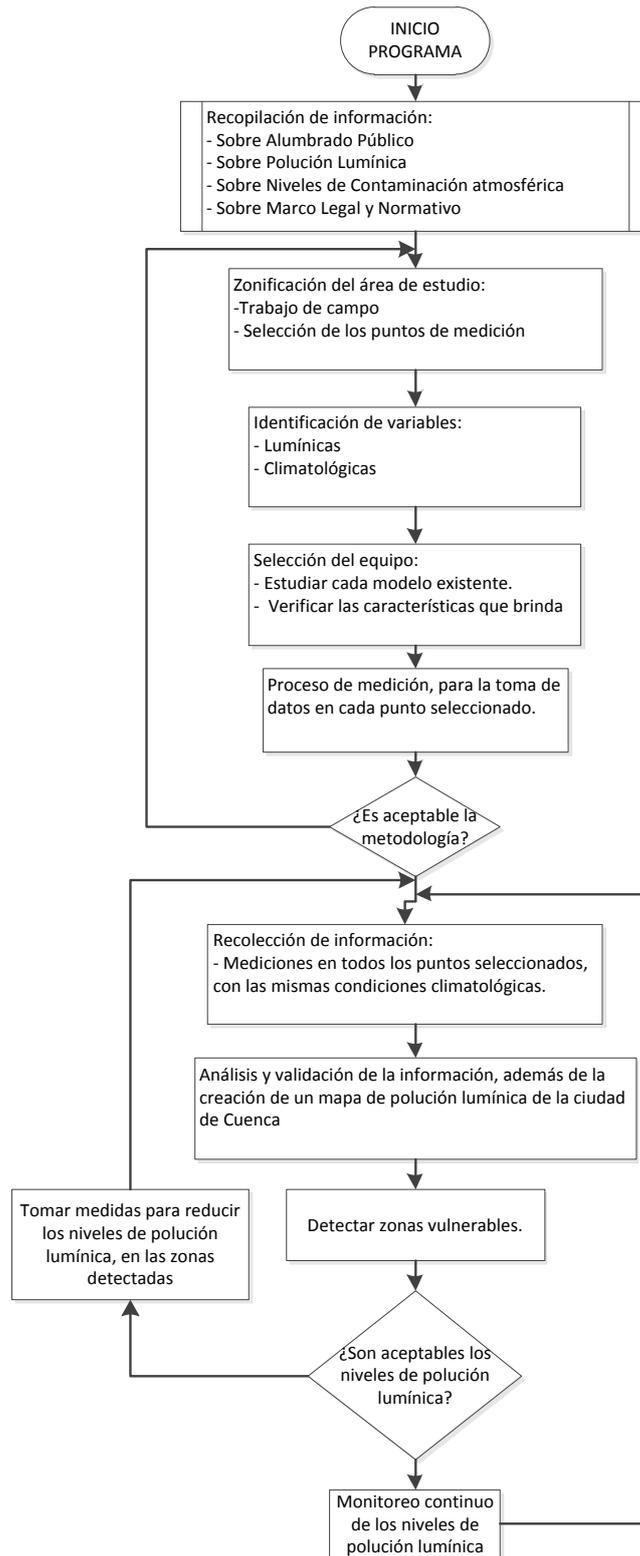


Figura 1. Diagrama de trabajo.

Para las mediciones realizadas, el equipo seleccionado fue el Sky Quality Meter en su modelo SQM-LU-DL, fabricado por la empresa Unihedron, siendo un fotómetro que mide el brillo de los cielos en la noche en una banda espectral semejante a la de la sensibilidad humana. La unidad de medida del equipo SQM-LU-DL son las mag/arcseg<sup>2</sup>, que se puede definir como el brillo de una estrella medido en magnitudes en una superficie de un arcseg<sup>2</sup> (unidad de área medida sobre el cielo).

Se recomienda que las mediciones se realicen durante el periodo de funcionamiento de las baterías del equipo, tomando como datos válidos aquellos que tienen hasta un 86% de visibilidad de la superficie lunar. El proceso de medición y descarga de información siguió un procedimiento sistemático, como se explica en Guanquiza & Quito (2014).

Para el análisis de los datos medidos, se debe tener en cuenta que otras fuentes de luz influyen en los valores evaluados, con lo cual la validación deberá considerar aquellos valores a partir de dos horas después de anochecer y dos antes del amanecer, de esta manera se evita los aportes de flujo luminoso que no son por contaminación lumínica.

### 2.2. Escala propuesta

Tomando como punto de partida referencias internacionales (IDA, 2007) y de acuerdo a los datos recolectados y resultados obtenidos, se propone una escala y simbología (color) para centros urbanos, donde la iluminación es primordial, como se muestra en la Tabla 1.

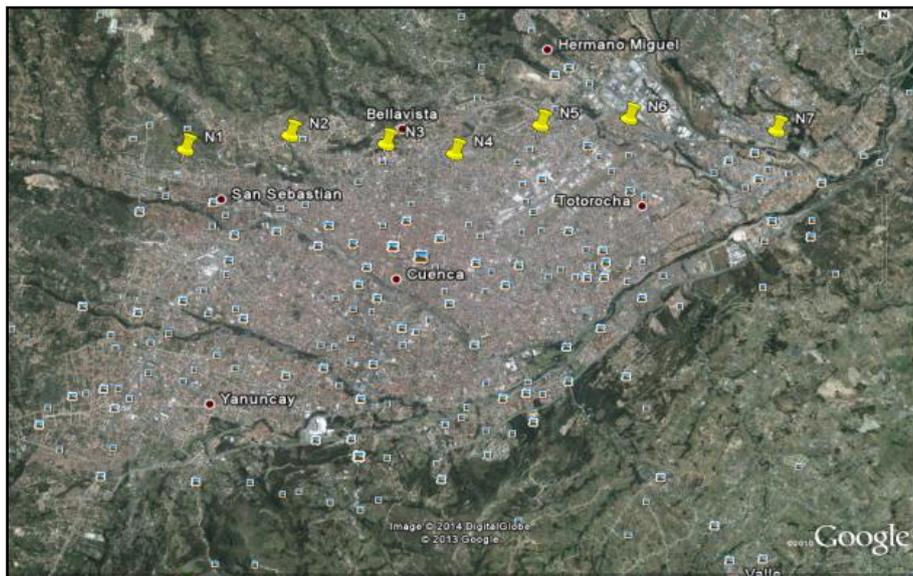
**Tabla 1.** Escala y simbología propuestas para centros urbanos.

Magnitud (MSAS)	Significado	Color
SQM < 15,4	Muy contaminado	Blanco
SQM 15,4 – 16,6	Contaminado	Rojo
SQM 16,6 – 17,8	Medianamente contaminado	Naranja
SQM 17,8 – 18,8	Ligeramente contaminado	Amarillo
SQM 18,8 – 21,6	Aceptable	Verde

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1. Zona norte de la ciudad

Se efectuaron las mediciones en siete lugares distintos, en la Fig. 2 se puede observar los puntos analizados. En la referencia Guanquiza & Quito (2014) se muestran las direcciones exactas de cada punto de medición.



**Figura 2.** Puntos Zona Norte.

De los resultados obtenidos, el punto N7 es uno de los más críticos con un valor promedio de luminancia del cielo de 16,19 mag/arcseg<sup>2</sup>, y una desviación estándar de 0,64, encontrándose en un nivel contaminado (Tabla 2).

**Tabla 2.** Luminancia del cielo en el punto N7 (Zona Norte) de la ciudad de Cuenca.

	N7	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	16,19	0,0362
Media:	16,17	0,0367
Moda:	15,86	0,0489
Total mediciones	47	47
Mínimo	15,35	0,0782
Máximo	17,95	0,0071
Desviación Estándar	0,64	0,02
Nivel PL	CONTAMINADO	

Para el punto N7, el día de medición tuvo un porcentaje de iluminación de la luna de 38,09%, nubosidad del 35%, humedad del 55%, una temperatura ambiente de 11°C, sin presentarse lluvias. Para efectos comparativos únicamente, se estableció que una correlación entre el brillo del cielo y los factores analizados (nubosidad, humedad y temperatura) era significativa si el valor era superior al 50% (0,5) y no significativa si era menor a dicho valor.

Al analizar la zona norte, se tuvo una correlación positiva entre los valores de brillo del cielo y la nubosidad, es decir si la nubosidad aumenta el brillo del cielo también lo hace, pero el índice de correlación es bajo (<0,5), y se considera a la relación como no significativa. La correlación entre el brillo del cielo y la humedad fue negativa, es decir si la humedad aumenta disminuyen los valores de brillo del cielo, aumentando los niveles de polución lumínica, recordando que entre menor es este valor, mayor es la luminancia del cielo, pero el índice de correlación es bajo (<0,5), y se considera a la relación como no significativa. Así mismo, entre los valores de brillo de cielo y la temperatura se obtuvo una correlación negativa, pero no significativa, para esta zona.

### 3.2. Otras zonas de la ciudad

De igual forma se procedió a levantar la información en las otras zonas de la ciudad, donde se ubicaron varios puntos de medición, se determinó el punto más crítico por cada zona, el valor correspondiente de luminancia del cielo y su equivalente. Los resultados se presentan en las Figs. 3 a 8 y en las Tablas 3 a 8.

**Tabla 3.** Luminancia del cielo en el punto S1 (Zona Sur) de la ciudad de Cuenca.

	S1	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	15,64	0,0598
Media:	15,62	0,0612
Moda:	15,33	0,0797
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,00	0,2713
Máximo	18,11	0,0062
Desviación Estándar	0,88	0,06
Nivel PL	CONTAMINADO	

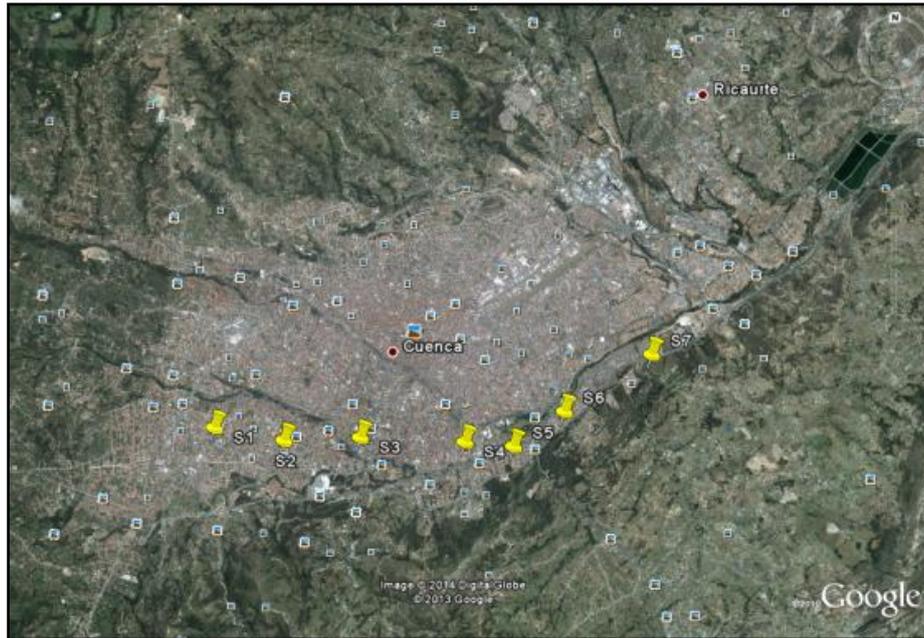


Figura 3. Puntos Zona Sur.

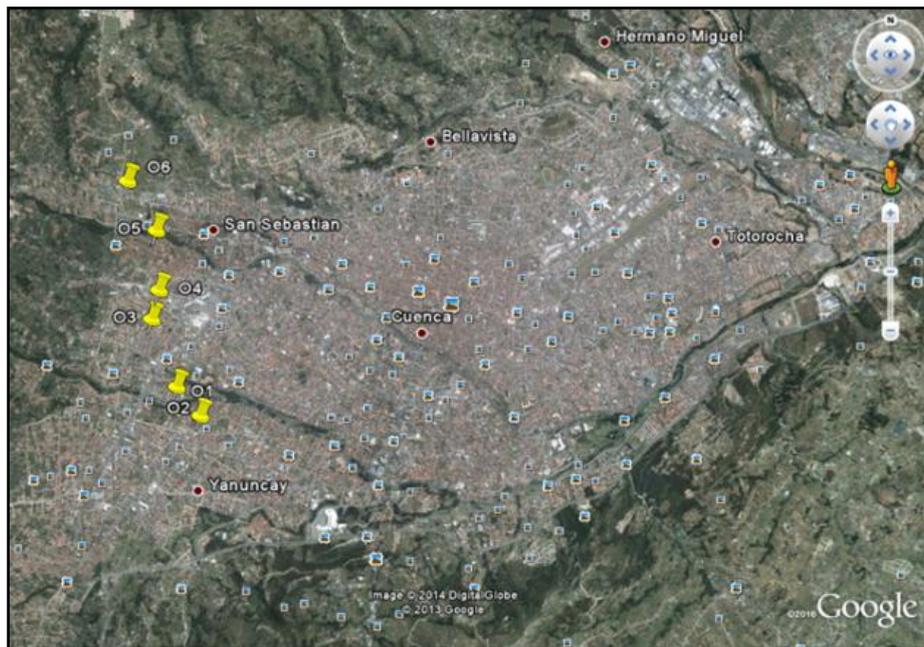


Figura 4. Puntos Zona Oeste.

Tabla 4. Luminancia del cielo en el punto O2 (Zona Oeste) de la ciudad de Cuenca.

	O2	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	15,60	0,0620
Media:	15,57	0,0636
Moda:	16,21	0,0354
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,31	0,2039
Máximo	17,77	0,0084
Desviación Estándar	0,95	0,05
Nivel PL	CONTAMINADO	

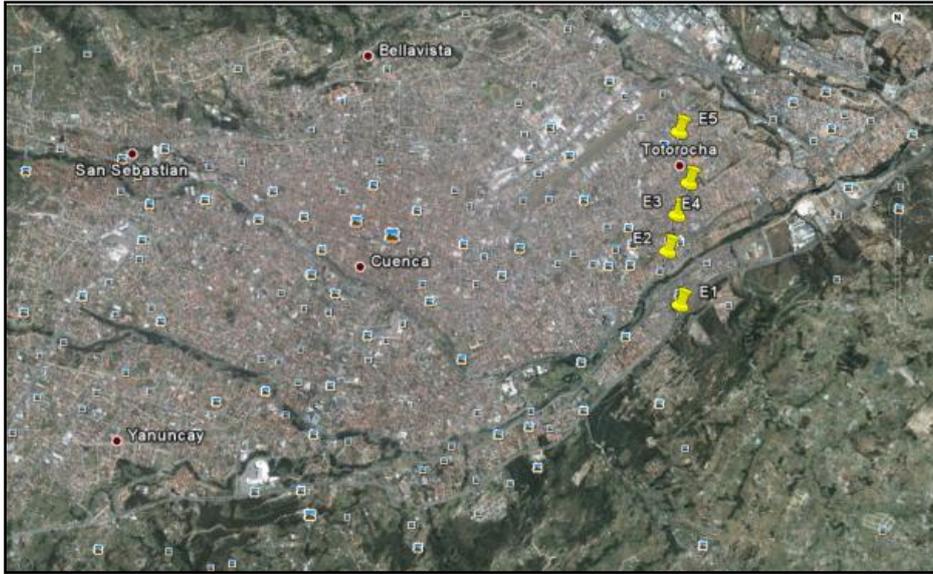


Figura 5. Puntos Zona Este.

Tabla 5. Luminancia del cielo en el punto E3 (Zona Este) de la ciudad de Cuenca.

	E3	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	15,75	0,0539
Media:	15,74	0,0546
Moda:	15,12	0,0967
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,74	0,1372
Máximo	16,96	0,0178
Desviación Estándar	0,66	0,03
Nivel PL	CONTAMINADO	

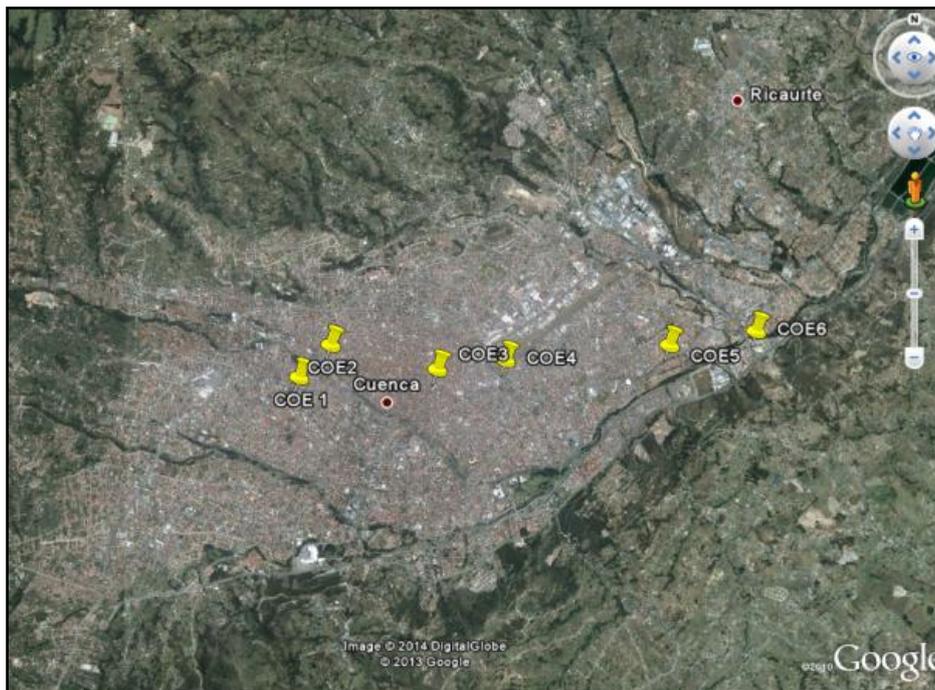
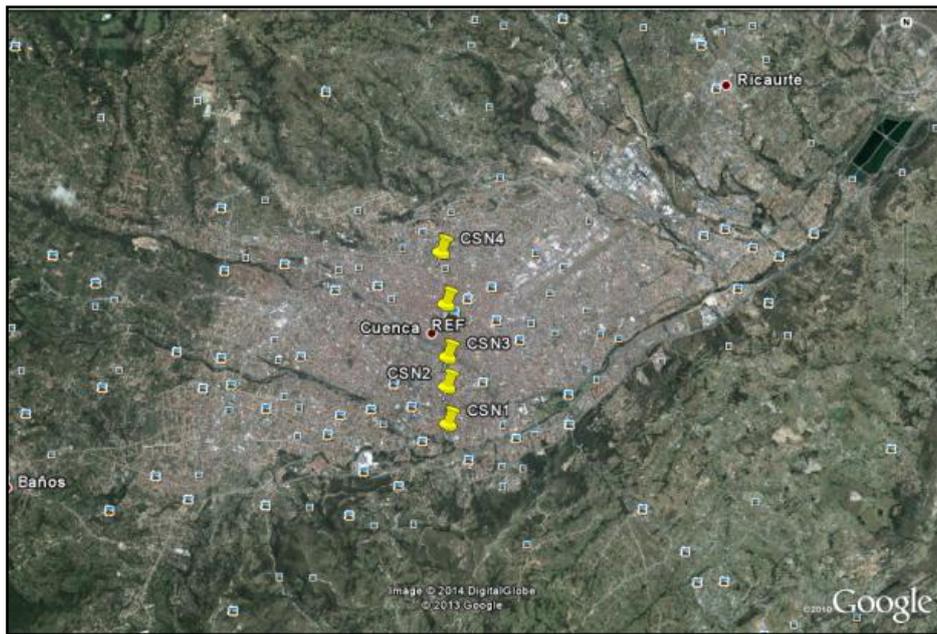


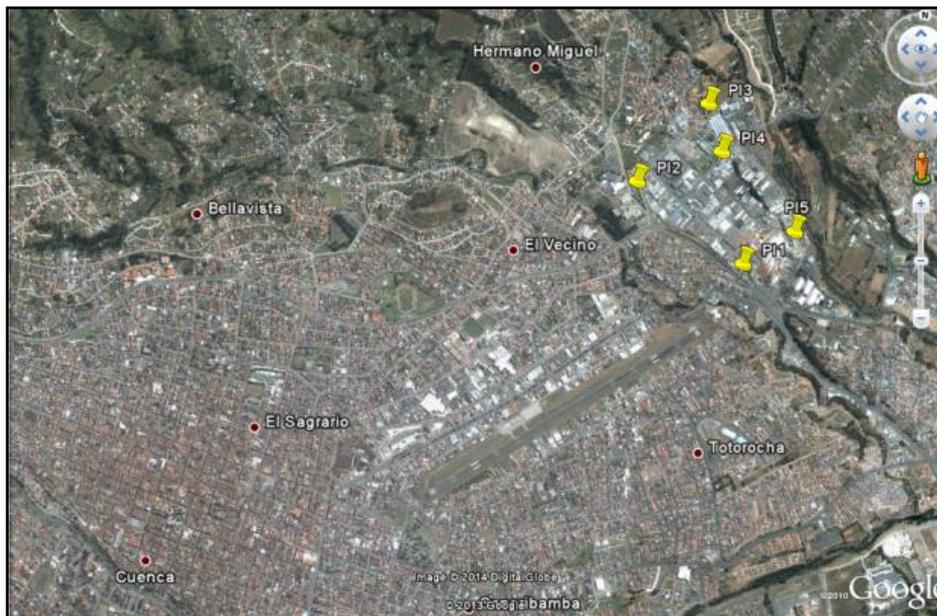
Figura 6. Puntos Zona Céntrica Oeste-Este.

**Tabla 6.** Luminancia del cielo en el punto COE2 (Zona Centro Oeste-Este), ciudad de Cuenca.

	MSAS	COE2 (cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	15,17	0,0924
Media:	15,16	0,0929
Moda:	14,77	0,1335
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,42	0,1843
Máximo	16,87	0,0193
Desviación Estándar	0,45	0,03
Nivel PL	MUY CONTAMINADO	



**Figura 7.** Puntos Zona Céntrica Sur-Norte.



**Figura 8.** Puntos Zona Parque Industrial.

**Tabla 7.** Luminancia del cielo en el punto CSN3 (Zona Centro Sur-Norte), ciudad de Cuenca.

	CSN3	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	15,19	0,0910
Media:	15,18	0,0915
Moda:	15,63	0,0605
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,41	0,1860
Máximo	16,24	0,0345
Desviación Estándar	0,43	0,04
Nivel PL	MUY CONTAMINADO	

**Tabla 8.** Luminancia del cielo en el punto PI5 (Parque Industrial) de la ciudad de Cuenca.

	PI5	
	MSAS	(cd/m <sup>2</sup> )
Promedio:	14,91	0,1176
Media:	14,90	0,1180
Moda:	14,73	0,1385
Total mediciones	47	47
Mínimo	14,61	0,1547
Máximo	16,45	0,0284
Desviación Estándar	0,31	0,03
Nivel PL	MUY CONTAMINADO	

### 3.3. Resumen de resultados

La Tabla 9 muestra un resumen de los resultados obtenidos. En la última columna de esta tabla se incluye la equivalencia, en función de la escala planteada en la Tabla 1. Si bien se destaca únicamente el punto más crítico, al haberse levantado en promedio varios puntos por zona, es posible un mapeo zonal de la contaminación lumínica debido al alumbrado público, en base a los parámetros establecidos en la Tabla 1. Además, con suficiente información levantada y contrastada, es posible en el futuro llegar a establecer un mapa general para la contaminación lumínica en la ciudad de Cuenca.

**Tabla 9.** Resumen de resultados.

ZONA	Punto Crítico	Dirección	Valor (mag/arcseg <sup>2</sup> )	Equivalente
Norte	N7	Calle Victoria del Portete	16,19	Contaminado
Sur	S1	Av. Loja y Don Bosco	15,64	Contaminado
Oeste	O2	Calle Paute y Cieza de León	15,60	Contaminado
Este	E3	Calle trece de Abril	15,75	Contaminado
Centro norte-sur	CSN3	Cámara de Industrias	15,19	Muy Contaminado
Centro este-oeste	COE2	Calle Emilio Arévalo	15,17	Muy Contaminado
Parque industrial	PI5	Calle Paseo Río Machángara	14,91	Muy Contaminado

En cuanto a la correlación existente entre el brillo del cielo, por zona, y los factores que afectan al mismo (nubosidad, humedad y temperatura), los resultados son generalmente consistentes aunque no siempre significantes. La Tabla 10 resume los resultados obtenidos. De la Tabla 10 se puede concluir que la única correlación significativa (siempre negativa), se presenta entre los valores de brillo de cielo y la humedad, en tres de las siete zonas analizadas. La temperatura tiene también una correlación siempre negativa con el brillo del cielo, aunque no significativa en todas las zonas mientras

que la nubosidad no presenta una clara tendencia de correlación. Estos son aspectos que deberán analizarse más a fondo en futuras investigaciones.

**Tabla 10.** Correlación entre Brillo de Cielo y factores.

Factores	Norte	Sur	Oeste	Este
Nubosidad	+ (NS)	+ (NS)	- (NS)	+ (NS)
Humedad	- (NS)	- (NS)	- (NS)	- (S)
Temperatura	- (NS)	- (NS)	- (NS)	- (NS)
Factores	Centro este-oste	Centro sur-norte	Parque industrial	
Nubosidad	- (NS)	- (NS)	- (NS)	
Humedad	- (NS)	- (S)	- (S)	
Temperatura	- (NS)	- (NS)	- (NS)	

donde: + es correlación positiva; - es correlación negativa; y NS: No Significante; S: Significante

#### 4. CONCLUSIONES

Si bien se ha determinado que en zonas como el centro urbano de Cuenca los niveles de brillo del cielo están fuera de los rangos recomendados, con una planificación previa, análisis de la situación y toma de decisiones, se puede colocar poco a poco estos valores a punto, sin afectar las prestaciones de un buen servicio de alumbrado público.

La distancia para la colocación de los SQM-LU-DL, sugerida por la empresa proveedora, es la adecuada y las mediciones de brillo del cielo no presentan variaciones significativas al ser puestos a una menor distancia, permitiendo la optimización del número de equipos para futuras campañas de medición en la ciudad de Cuenca.

A partir de los resultados obtenidos en el trabajo “Medición de la Contaminación Lumínica en espacios naturales” (Solano Lamphar, 2010), y de las correlaciones realizadas con los datos obtenidos en las zonas de la ciudad de Cuenca (Tabla 10), se puede concluir lo siguiente: No se encontró una relación significativa entre la polución lumínica con la nubosidad y temperatura, debido a que los índices de correlación entre ellas tienen valores bajos. Se pudo encontrar una correlación negativa alta en las zonas Este, Centro Sur-Norte y Parque Industrial, entre la humedad y el brillo del cielo, esto sugiere que, cuando se tiene mayor humedad en la atmosfera se encontrarán más partículas de agua que reflejarán la luz, dando como resultado una reducción en los valores medidos de brillo del cielo (aumento de la contaminación lumínica). Cabe recalcar que en las zonas Norte, Sur, Oeste y Centro Oeste-Este no se obtuvieron valores significantes entre la humedad y el brillo del cielo, aunque su correlación fue siempre negativa. Este aspecto debería ser analizado en proyectos futuros.

Como limitación del presente estudio se debe mencionar que los valores medidos no son aún lo suficientemente representativos para una evaluación completa de la polución lumínica en Cuenca, debido a que no se tuvo continuidad en el tiempo, se realizaron mediciones parciales con un solo equipo, y además se tuvo diferentes condiciones de medida entre puntos y días de registro.

#### Desarrollos futuros

Continuar realizando mediciones para tener mayor cantidad de datos y conocer con más detalle la polución lumínica. Para ello, se recomienda establecer una red de monitoreo a fin de mantener actualizados los valores de polución lumínica de la ciudad, lo cual permitirá en el futuro contar con un registro en tiempo real y un mapa completo de la contaminación lumínica de Cuenca.

Se estimó que una red de monitoreo tendría un costo anual de funcionamiento de \$22.400 (Guanuquiza y Quito, 2014). Si se toma como referencia las estimaciones de la International Dark Sky Association (2007), se establece que el porcentaje de energía desperdiciada exclusivamente por causa de la polución lumínica es de un 20%, En base a la facturación del año 2013 por alumbrado público en la ciudad de Cuenca (datos proporcionados por Centrosur), al reducir un 20% de consumo se

podría recuperar aproximadamente \$900.000, valor que cubriría no solo el costo de la red de monitoreo sino que permitiría mejorar el sistema de iluminación de la ciudad.

Es recomendable que la Centrosur, y otras entidades relacionadas al tema, inicien campañas de información sobre la polución lumínica, para dar a conocer a la ciudadanía sobre los efectos y soluciones que se tienen para contrarrestar este fenómeno.

Finalmente, es recomendable que las empresas distribuidoras de electricidad en Ecuador trabajen con universidades y centros de investigación para profundizar en el conocimiento del fenómeno, desde una perspectiva técnico-académica a nivel nacional.

## AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es el resultado de la tesis de grado en ingeniería eléctrica de los dos primeros autores y se pudo realizar en base al convenio existente entre la Universidad de Cuenca y la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. Los autores agradecen el apoyo brindado por los funcionarios de Centrosur, y en particular al Ing. Iván Genovez y su grupo de trabajo.

## REFERENCIAS

- Cinzano, P., F. Falchi, 2012. The propagation of light pollution in the atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), 3337-3357.
- Falchi, F., P. Cinzano, C.D. Elvidge, D.M. Keith, A. Haim, 2011. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2714-2722.
- Guanuquiza, M., R. Quito, 2014. Análisis y metodología de evaluación de la polución lumínica causada por el sistema de alumbrado público en la ciudad de Cuenca. Tesis de Pregrado, Ingeniero Electrico, Universidad de Cuenca, 214 pp. Disponible en <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5531/1/Tesis.pdf>.
- IDA, 2007. International Dark Sky Association, Residencial Lighting (Good Neighbor Guide). IDA Practical Guide, International Dark Sky Association, 7 pp. Disponible en <http://www.darksky.org/assets/documents/PG3-residential-lighting.pdf>.
- INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda (CPV2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía, Quito, Ecuador. Disponible en <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/>.
- Solano Lamphar, H.A., 2010. *Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales*. Universitat Politècnica de Catalunya, Tesis doctoral, 300 pp. Disponible en <http://www.tdx.cat/handle/10803/6854>.