

# Luxamérica



Memorias  
XV Congreso Iberoamericano de  
Iluminación Bogotá

ISBN: 978-958-49-0271-9



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# LUXAMERICA

ISBN: 978-958-49-0271-9

Memorias

XV Congreso Iberoamericano de Iluminación Bogotá

© 2020

Universidad Nacional de Colombia

## **Coordinador general**

Ing. Fernando Herrera León

## **Comité científico**

Presidente: Dra. Ing. Paula Catalina Acuña

## **Comité académico**

Presidente: Dr. Ing. Jesús Quintero

## **Coordinadores de Salas**

Dr. Ing. Eduardo Manzano

Ing. Angélica Vargas Chavarro

Ing. Leonardo Bermeo

## **Comité Organizador**

*Universidad Nacional de Colombia*

Ing. Luis Alejandro Cárdenas

John Martínez

Laura Juliana Gordillo

Laura Yulieth Casas

Sergio Cabrera

Maria Camila Mejia

Andrea Rojas

## **ACDL**

Ing. Diana Catalina Benavides

Ing. Martin Arcos

Ing. Mario Quiroga

Ing. Jorge Curtidor

## **Poligrama**

Mauricio Rodríguez Ruiz

*Queda prohibida la reproducción total o parcial de estos artículos, sin citar su fuente, por cualquier medio electrónico o mecánico, sin autorización por escrito del autor.*

## **Organización Luxamérica 2020**

Universidad Nacional de Colombia

Avenida Carrera 30 N° 45-03 – Edif. 411

Bogotá D.C., Colombia

(+57 1) 316 5000, ext. 11145

info@luxamerica2020.com

*Diseñado por Poligrama*

## Tabla de contenido

Presentación .....	5
--------------------	---

### Sección 1. Luz, percepción y color

Colorimetría en cintas retroreflectivas y su análisis de incertidumbre .....	8
Diseño de iluminación de un edificio de oficinas teniendo en cuenta el estímulo circadiano basado en la guía UL DG 24480 .....	14
Transmitancia del ojo humano y percepción de luminosidad1 .....	21
Paisagem na antártica: os efeitos da luz na leitura e entendimento da dinâmica do ambiente .....	27

### Sección 2. Diseño de iluminación

Software para la calibración de luz extraviada en espectroradiómetros de matriz .....	36
Educación a distancia de luminotecnia .....	42
Parque Batlle, la cultura y el deporte como una realidad viva.....	49
Aplicativo para el esquema de mantenimiento en instalaciones de iluminación interior y exterior .....	62
Metodología de diseño de un sistema de iluminación integrador para centrales de urgencias hospitalarias .....	67
Diseño de iluminación interior de aeropuertos mediante el uso de luminarias arquitectónicas .....	74
Estrategias para el diseño de iluminación en escenarios deportivos.....	78
“Conexión natural” por medio de la experiencia nocturna.....	84

## **Sección 3. Nuevas tecnologías en iluminación**

Modelo de optimización lineal entera mixta aplicado a la planificación multiperíodo de inversiones en sistemas de alumbrado público .....	91
Evolución del alumbrado público en la ciudad de Rosario.....	98
Evaluación de la metodología de diseño de iluminación para túneles ópticamente largos con velocidades de transito reducidas .....	103
Radiación Ultravioleta C aplicada a la desinfección de ambulancias.....	109
Planteamiento del procedimiento de laboratorio para la calibración de una luminaria LED para transmisión de datos con modulación por corrimiento de color (CSK).....	116
Análise do projeto de iluminação pública da Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Maruípe .....	123
Human circadian monitoring: preparing an iot challenge at brazilian antartic station .....	129
Plataforma de gestión del alumbrado público 4.0 en el marco del desarrollo sostenible ....	135

## **Sección 4. Luz, hábitat y calidad de vida.**

Barreras que dificultan la adopción de planes estratégicos de iluminación en las ciudades argentinas .....	142
Diseño y validación de un sistema germicida con lámpara UVC de baja presión monocromática (254 nm) .....	147
Proposta para redução da poluição luminosa nas orlas capixabas .....	151
Nuevas propuestas de aplicación para mejorar la actual normativa de control de la contaminación lumínica en Chile.....	157

## **Presentación**

El XV Congreso iberoamericano de iluminación organizado por la Universidad Nacional de Colombia y la Asociación Colombiana de Luminotecnia, presenta un saludo a toda la comunidad de iluminación y comparte la producción académica, en educación, en investigación y aplicación en temas como color, percepción, diseño de proyectos de iluminación del hábitat interior o exterior y las aplicaciones para la gestión y administración de sistemas de iluminación.

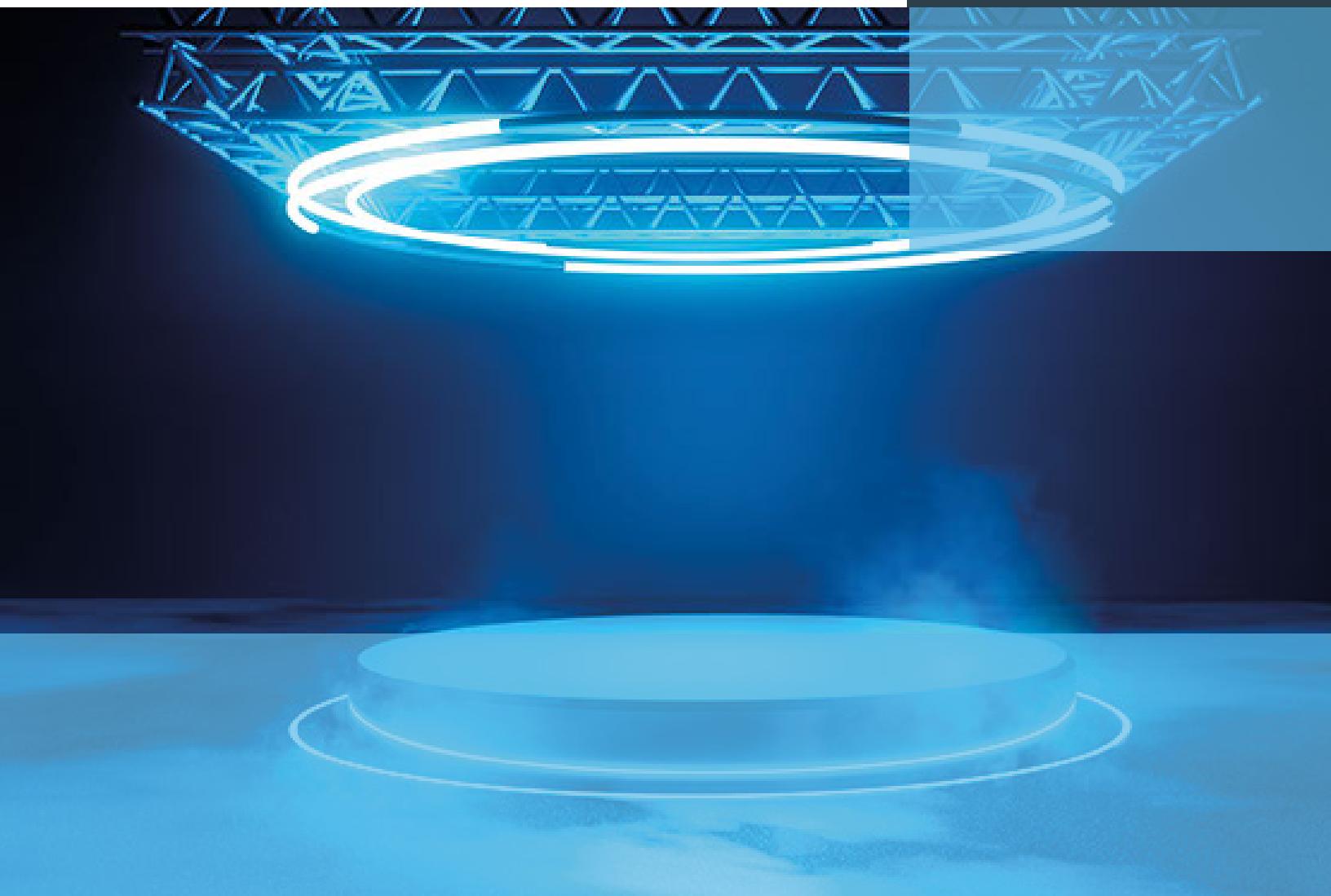
La propuesta de actualización académica de LUXAMÉRICA 2020, que mediante conferencias magistrales, las memorias y las ponencias de trabajos de investigación, busca expandir el horizonte conceptual hacia desarrollo y la adopción de estándares de diseño de iluminación, combinando los factores humanos y la eficiencia energética, las aplicaciones de la tecnología LED en la integración de las funciones visuales y biológicas en contexto de cuidado del ambiente y de mejoramiento de la calidad de vida de la población.

La Organización desea agradecer a nuestros conferencistas, investigadores y asistentes por la oportunidad ofrecida y la motivación para desarrollar LUXAMÉRICA 2020 bajo las circunstancias de tipo mundial y regional generadas por la pandemia. Los productos generados son una muestra de la vitalidad y la fortaleza del sector de la iluminación y confirman su condición de liderazgo científico a nivel mundial y regional.

A todos los integrantes de esta comunidad, nos queda el reto de seguir intercambiando buenas prácticas de diseño en iluminación, contribuir a mejorar la salud y la calidad de vida de la población, consolidar las iniciativas de nuevos laboratorios de ensayo, pero principalmente, darle una oportunidad a la educación y a la formación universitaria de especialistas y diseñadores de iluminación.

*Fernando Augusto Herrera León  
Coordinador académico  
Profesor  
Universidad Nacional de Colombia*





# **Sección 1.**

## **Luz, percepción y color**

# Colorimetría en cintas retroreflectivas y su análisis de incertidumbre

Laura Parada Aguilar<sup>1,a</sup>, Miguel A. Chávez Cañón<sup>1,b</sup>, Francisco Amórtegui G<sup>1,c</sup>. Jesús M. Quintero<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia

<sup>a</sup> [lparadaa@unal.edu.co](mailto:lparadaa@unal.edu.co), <sup>b</sup> [mazhavezc@unal.edu.co](mailto:mazhavezc@unal.edu.co), <sup>c</sup> [fiamortegui@unal.edu.co](mailto:fiamortegui@unal.edu.co), <sup>d</sup> [jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co)

**Resumen**— El uso de cintas retroreflectivas en vehículos de carga es obligatorio por su eficiencia para incrementar la seguridad en las carreteras. Por esta razón, certificar su cumplimiento de los requerimientos básicos de calidad de este tipo de cintas es muy importante. Este documento presenta el proceso de medición y cálculo de incertidumbre de las propiedades colorimétricas de cintas retroreflectivas, con el fin de evaluar si estas cumplen con las especificaciones de acuerdo con normas internacionales y nacionales a nivel Colombia. El sistema de medición está compuesto por un espectrofotómetro, un sistema de sondas bifurcadas, muestras de referencia reflectiva calibradas, un riel y soporte metálico y una fuente de banda ancha con aporte espectral en todo el rango visible. Para la automatización de cálculos y la agilización del proceso de prueba para aceptación o no de la muestra bajo prueba se ha desarrollado un software en MATLAB, el cual da información numérica y gráfica del resultado.

**Palabras clave.** Colorimetría, retrorreflexión, color, incertidumbre.

**Abstract.** The use of retro-reflective tapes in cargo vehicles is mandatory for its efficiency to increase safety on the roads. For this reason, certifying your compliance with the basic quality requirements is very important. This document presents the process for measuring and calculating the uncertainty of the colorimetric properties of retroreflective tapes, in order to evaluate whether they meet the specifications in accordance with international and national standards at the Colombian level. The measurement system consists of a spectrophotometer, a bifurcated fiber optic probe system, calibrated reflection standards, a support rail, and a broadband source with spectral input throughout the visible range. To automate calculations and speed up the test acceptance process, a MATLAB software has been developed in order to show results in a numerical and graphics way.

**Key Words.** Colorimetry, retroreflection, color, uncertainty.

## 1. Introducción

Las señales de tránsito en todo el mundo suelen utilizar materiales retrorreflektivos, idealmente estos deberían reflejar toda la luz no absorbida en la dirección incidente, si bien, este no es el caso, tanto para luz día, iluminación difusa, y luz nocturna, iluminación directa desde un vehículo, los materiales tienen un error lo suficientemente pequeño que permite idealizarlos. La norma ASTM D4956-19 establece las características que debe tener este tipo de material para ser usado en aplicaciones de control de tránsito. [1].

A nivel nacional, según la resolución 3246 del 2018 del ministerio de transporte de Colombia, los vehículos de carga deben tener una demarcación con cintas retrorreflektivas cumpliendo las Normas Técnicas Colombianas NTC 5807 y NTC 4729, en las cuales se especifica la posición de la cinta sobre el vehículo y los requerimientos físico-técnicos que debe cumplir [2]. Actualmente, existen productores nacionales de cintas retrorreflektivas, pero no hay laboratorios que puedan

certificar que estas cumplen con los requerimientos básicos de calidad. En especial, se encuentra una dificultad con la validez de los ensayos referentes al color.

La norma NTC 4729 no provee o sugiere un montaje específico para la medición del color, sin embargo, en el numeral 7.4 a luz día se menciona el uso del iluminante CIE D65, la medición de luminancia y el observador estándar CIE 2° [3]. Al no disponer del iluminante requerido y su dificultad de recrearlo con exactitud, en este trabajo se propone un montaje con sonda bifurcada y de geometría uniplanar que no mide la luminancia, sino que trabaja con los espectros como se refiere en la norma ASTM E811 [4]. Además, se desarrolla un software que hace la corrección sobre los resultados obtenidos para ajustarlos al iluminante requerido (CIE D65).

## 2. Marco teórico

### A. Percepción del color

Cuando la luz proveniente del sol o cualquier otra fuente luminosa golpea un objeto, la luz incidente en dicho objeto se divide en componentes que son absorbidas, transmitidas, dispersadas y reflejadas, para estas últimas habrá componentes de longitud de onda que sean reflejadas en un mayor porcentaje que otras. El espectro que muestra para cada longitud de onda que porcentaje la luz incidente es reflejada, es lo que entendemos como espectro de reflectancia. Si no hay una fuente de luz estimulante nuestros ojos no podrían percibir visualmente la presencia del objeto, el estímulo espectral que perciben nuestros ojos, dígase  $S(\lambda)$ , entonces, es el producto de la luz que ilumina el objeto (iluminante,  $Ill(\lambda)$ ) y el espectro de reflectancia del objeto  $R(\lambda)$ .

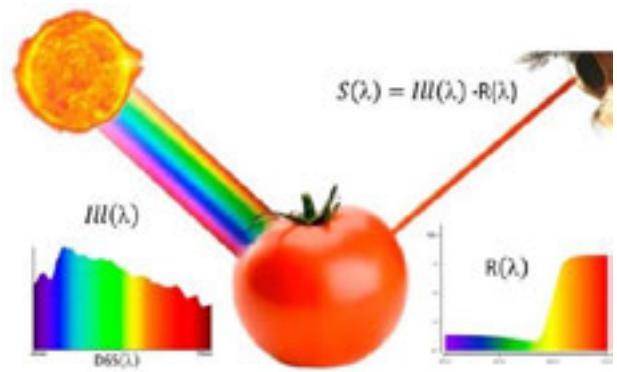


Fig 1 Descripción de la forma en la que se percibe el color, el espectro de la fuente de luz (inferior izquierda) corresponde al iluminante CIE D65.

## B. Cintas retroreflectivas

**Retroreflexión:** Propiedad de irradiar hacia la dirección de origen los rayos incidentes sobre una superficie [4]. Las cintas retroreflectivas son láminas con material adhesivo que tienen esta propiedad por una de sus caras. Existen once tipos de requerimiento de desempeño, en este caso, el material debe ser de tipo V y de color rojo y blanco, el tipo determinará los valores que debe cumplir el material en cuanto a coeficiente retroreflexión, intemperización en exteriores y factor de luminancia a la luz del día, entre otros [2].

## C. Requerimiento de color en las cintas retroreflectivas

El color debe especificarse en el espacio de color CIE 1931  $xyY$ , además el iluminante utilizado deber ser el estándar CIE D65 Fig.1. Cualquier valor entre los 4 puntos dados por la Tabla 2 cumple con la norma [2].

Tabla 1. Rango colorimétrico de aceptación.

Color		Rojo	Blanco
1	X	0.648	0.303
	Y	0.351	0.300
2	X	0.735	0.368
	Y	0.265	0.366
3	X	0.629	0.340
	Y	0.281	0.393
4	X	0.565	0.274
	Y	0.346	0.329

Para el ensayo de color se demarca un cuadrilátero en el diagrama de cromaticidad CIE 1931(véase Fig. 8 y 9), si la cromaticidad de  $S(\lambda)$  se encuentra dentro, entonces cumple con los requerimientos colorimétricos.

La naturaleza espectral de la luz proveniente de un retroreflector depende de la distribución espectral de la radiación de la fuente, el iluminante  $Ill(\lambda)$  y la reflectancia espectral  $R(\lambda)$  como se muestra en la Fig.1, cambiando el material sobre el que incide el iluminante y teniendo claro que el ángulo de retroreflexión será mucho más pequeño. Haciendo uso de las distribuciones espectrales y las funciones armónicas de color  $\bar{x}, \bar{y}$  y  $\bar{z}$ , se hallan los valores triestímulos X, Y y Z haciendo uso de (1), (2) y (3).

$$X = k \int_{380}^{780} Ill(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \int_{380}^{780} Ill(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} Ill(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

Una vez obtenidos los valores triestímulos, estos valores se pueden trasladar a cualquier espacio de color. Las relaciones (4), (5) y (6) son útiles para obtener la cromaticidad CIE 1931.

$$x = X/(X + Y + Z) \quad (4)$$

$$y = Y/(X + Y + Z) \quad (5)$$

$$z = Z/(X + Y + Z) \quad (6)$$

La constante de normalización  $k$  se cancela cuando se calculan las coordenadas de cromaticidad.

## D. Cálculo de incertidumbre

En cualquier campo la estimación de un mesurando requiere estimaciones precisas de incertidumbres asociada siguiendo los principios descritos en la Guía ISO para la expresión de incertidumbre en la medición [7]. En este artículo, los métodos de la Guía ISO y las relaciones descritas por Gardner [5] se utilizan para estimar la incertidumbre para las coordenadas de cromaticidad en el espacio de color CIE 1931.

La Guía ISO1 define la incertidumbre estándar  $u_c(y)$  de un mensurando  $y$ , dependiendo de las cantidades de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a través de la función (7)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

en términos de la varianza combinada (8):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n r(x_i, x_j) \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) \quad (8)$$

En donde  $u(x_i)$  es la incertidumbre estándar en  $x_i$  y  $r(x_i, x_j)$  es el coeficiente de correlación entre las variables  $x_i$  y  $x_j$ . La derivada  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  es el coeficiente de sensibilidad para la dependencia de  $y$  en  $x_i$ .

### Incertidumbre de las coordenadas de color debido a la intensidad

De la ecuación (8) se deduce que el cuadrado de la incertidumbre estándar  $u_c(x)$  en  $x$  debido a la incertidumbre en la amplitud del espectro de reflectancia  $R_i(\lambda)$  esta dado por (9),

$$u_c^2(x) = \sum \left( \frac{\partial x}{\partial R_i} \right)^2 u^2(R_i) \quad (9)$$

donde las derivadas representan los coeficientes de sensibilidad para los valores de  $R_i$  independientes y por lo tanto no correlacionados (10) y (11).

$$\frac{\partial x}{\partial R_i} = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}\bar{t}_i}{\sum R_i \bar{t}_i} \quad (10)$$

$$u_c^2(x) = \frac{\sum(\bar{x}_i - x\bar{t}_i)^2 u^2(R_i)}{\sum R_i \bar{t}_i} \quad (11)$$

En donde  $t_i$  es la suma de las funciones armónicas de color (12)

$$\bar{t}_i = \bar{x}_i + \bar{y}_i + \bar{z}_i \quad (12)$$

Además, la incertidumbre para cada valor  $R_i$  esta dado por (13)

$$u(R_i) = \alpha_o + \alpha_i R_i \quad (13)$$

En donde  $\alpha_o$  es un valor que depende la señal de ruido negro, que puede omitirse en caso de haber sido restada de forma eficiente en la medición.  $\alpha_i$  es la incertidumbre relativa para cada valor  $i$ , si este valor fuese constante para todo el espectro,  $u(R_i) = \alpha R_i$  entonces se tendrían las relaciones (14) y (15) para la cromaticidad en el espacio de color CIE 1931.

$$u_c(x) = \frac{\alpha (\sum E_i^2 \bar{x}_i^2 - 2x \sum E_i^2 \bar{x}_i \bar{t}_i + x^2 \sum E_i^2 \bar{t}_i^2)^{1/2}}{\sum E_i \bar{t}_i} \quad (14)$$

$$u_c(y) = \frac{\alpha (\sum E_i^2 \bar{y}_i^2 - 2y \sum E_i^2 \bar{y}_i \bar{t}_i + y^2 \sum E_i^2 \bar{t}_i^2)^{1/2}}{\sum E_i \bar{t}_i} \quad (15)$$

Los resultados presentados en este artículo consideran el coeficiente de incertidumbre relativa  $\alpha_i$  para cada valor del espectro de reflectancia diferente.

### Incercidumbre de las coordenadas de color debido a la longitud de onda

Calcular el efecto en la incertidumbre debida a errores correlacionados en la longitud de onda no es posible por el enfoque de derivada parcial, para esto se debe utilizar el enfoque de Monte Carlo. Considerando el enfoque clásico de calculo de incertidumbre GUM [8] se puede calcular la incertidumbre en los valores triestimulos como en la ecuación (16):

$$u_c^2(X) = \sum \left( \frac{\partial (R_i \bar{x}_i)}{\partial \lambda} \right)^2 u^2(\lambda) \quad (16)$$

En donde la incertidumbre aleatoria en  $\lambda$  se supone independiente de  $\lambda$ .  $\bar{x}_i$  es una un vector constante definido por la CIE. Además, si  $R_i$  es separable, las incertidumbres relativas en cada uno de los valores triestimulos X, Y y Z, se notarían  $\beta_x, \beta_y, \beta_z$  y vendrían dada por (17),

$$\beta_x = \frac{\sqrt{\sum \left( \frac{\partial \bar{x}_i}{\partial \lambda} \right)^2}}{\sum \bar{x}_i} u(\lambda) \quad (17)$$

Con esto se puede estimar la incertidumbre en las coordenadas de color  $(x, y)$ , siguiendo las expresiones (18) [5].

$$u_c(x) = x \{ (x-1)\beta_x^2 + y^2 \beta_y^2 + (x+y-1)^2 + 2y(x-1)\beta_x \beta_y r_{XY} - 2(x-1)(x+y-1)\beta_x \beta_z r_{XZ} - 2y(x+y-1)\beta_y \beta_z r_{YZ} \}^{1/2} \quad (18)$$

### 3. Montaje experimental

Es bastante difícil recrear con exactitud el iluminante solicitado (CIE D65), de modo que se hace uso de un montaje con una sonda bifurcada como el que se muestra en figura 2, que evita tener el iluminante de forma física.

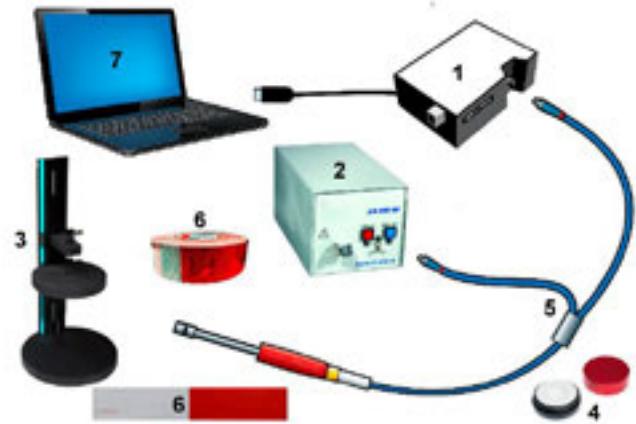


Fig. 2 montaje con sonda bifurcada para la medición del espectro de reflectancia de cintas retroreflectivas. Imagen creada a partir de ilustración de los equipos del fabricante.

La luz incidente proveniente de una fuente halógena más deuterio (2) viaja por la fibra óptica bifurcada (5) hasta la cabeza de la sonda que estimula la cinta retroreflectiva (6) que se sitúa sobre el riel óptico (3), la cabeza de la sonda tiene unos hilos que llevan la luz de la fuente hasta la cinta, y tiene otros hilos que captan la luz reflejada de la cinta, esta captura  $S(\lambda)$  se devuelve por la cinta, con la ventaja que la señal que llega al espectrómetro (1) es la señal medida menos la luz de estimulación, es decir, el espectro de reflectancia de la cinta  $R(\lambda)$ . De esta forma, computacionalmente es sencillo multiplicar dicho espectro por el espectro del iluminante requerido para la prueba, posteriormente se hacen los cálculos colorimétricos necesarios, sin tener que recrear el iluminante físicamente o usar filtros.

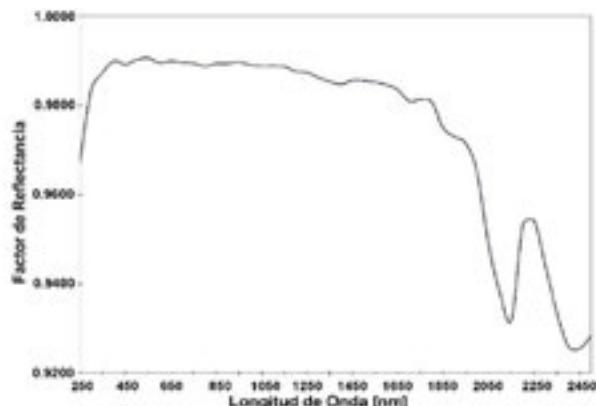


Fig. 3 Espectro de reflectancia del parche blanco de referencia. Ilustrado como (4) en la figura 5, el factor de reflectancia es siempre mayor que 0.98 para todo el rango visible, imagen tomada del certificado de calibración.

Antes de la medida de la cinta, el software de medición en el ordenador (7) ha sido configurado de tal forma que tome la referencia de reflectancia 100% realizando la misma medición, pero en lugar de colocar la cinta (6) en el riel óptico (3) se coloca la muestra de referencia reflectiva calibradas (4), cuya reflectancia se aproxima a 100% para todo el espectro visible (Véase Fig.3), de esta forma, se ajustan las posibles desviaciones en la amplitud del espectrofotómetro. El valor de referencia por debajo, igual a 0% corresponde a la señal de ruido negro del equipo, que corresponde a la señal censada sin existir luz de excitación.

Para la medición del espectro de reflectancia  $R(\lambda)$  se usa el software del fabricante, el cual permite guardar las mediciones, para la posterior multiplicación por el iluminante y el estudio de los datos colorimétricos se usa un software desarrollado por los autores, el cual carga las mediciones, analiza los datos; retira datos atípicos obtenidos en la medición usando el criterio de Tukey, muestra los resultados colorimétricos, determina si la cinta cumple o no con los criterios colorimétricos, y guarda los resultados en una hoja de Excel, que se utiliza para generar el informe de la prueba.

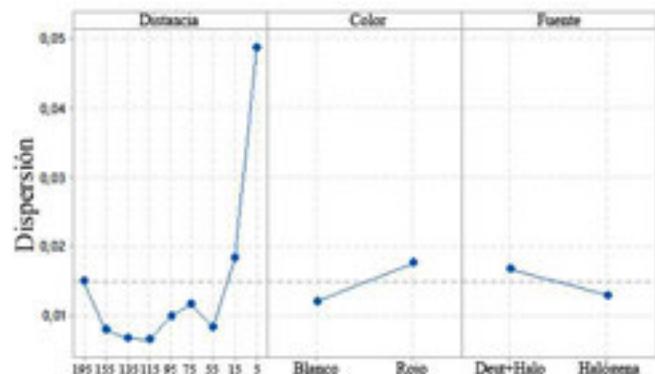
#### 4. Implementación experimental & Análisis de resultados

##### A. Ensayo de repetibilidad:

Con el fin de encontrar y cuantificar (tipo A) las fuentes de incertidumbre se repite el experimento y se guardan las mediciones para diferentes días, cambiando el operador, además para determinar la susceptibilidad de algunos parámetros del ensayo se modifican algunas características del ensayo para la cinta roja y blanca. Se hace una variación de la distancia fibra-cinta, además se consideran 5 mediciones por día. En total, el experimento tiene una duración de 3 días y se usan 2 fuentes de iluminación distintas: halógena con deuterio, y halógena únicamente.

La gráfica 4 muestra los resultados procesados por medio de la herramienta de software para estadística para la variabilidad de la cromaticidad, es decir se estudia la dispersión de los datos

con el montaje sugerido, más no la exactitud, pues este se presenta en un trabajo posterior. Es evidente que la distancia fibra-sonda es un factor clave, pues muy cerca el sistema ve franjas que componen la cinta, mientras que lejos, la luz que llega de la sonda misma tiene un nivel muy bajo. De esta forma se determina que la distancia ideal está entre 11.5 y 13.5 cm. Con respecto al color de la cinta, el rojo tiene una mayor variabilidad, sin embargo, cabe recalcar que el espacio CIE 1931 no es homogéneo.



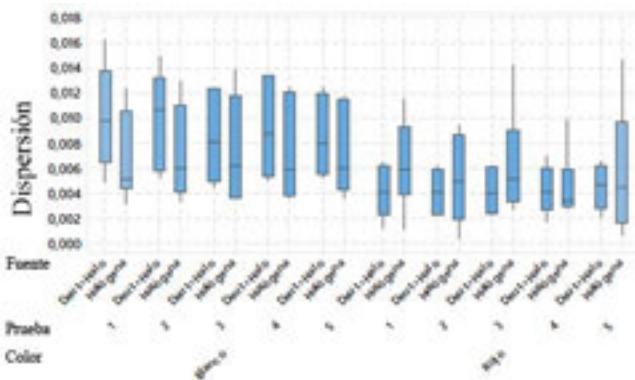


Fig. 6 Gráfica de caja para la dispersión en la cromaticidad CIE 1931 en función de la fuente de luz de excitación, la prueba y la cinta.

La variabilidad para el montaje es menor a 0,016 de acuerdo con la gráfica 6, esto es un nivel aceptable para este tipo de pruebas. La dispersión con la fuente halógena es menor a la fuente que considera el deuterio, sin embargo, la ventaja de usar deuterio es el componente en la región de longitud de onda corta de esta fuente, lo que mejora la relación señal ruido del espectro de reflectancia.

#### B. Resultados colorimétricos y cálculo de incertidumbre

Los resultados presentados en este apartado corresponden a los cálculos realizados por el software desarrollado en Matlab para esta aplicación, este procesa un grupo de mediciones para cada una de las cintas. Las mediciones a la cinta blanca corresponden al uso de la fuente de halógena, mientras que para la cinta roja se usó la fuente de halógeno con deuterio.

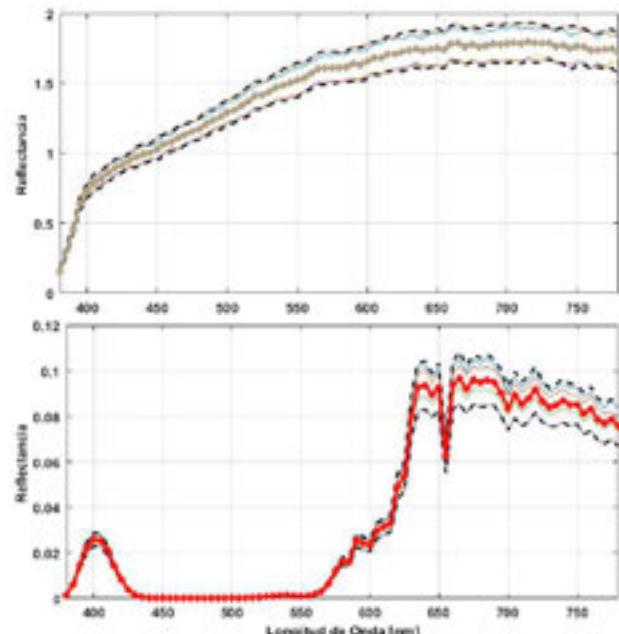


Fig. 7 Espectros de reflectancia tomados para las cintas roja y blanca. La línea más gruesa del color de la cinta corresponde al espectro promedio, mientras que las líneas punteadas arriba y debajo de cada línea promedio

significan la bandapectral delimitada superior e inferiormente que se tiene en cuenta para el cálculo de la incertidumbre.

Como se puede ver en la figura 8, ambas cintas pasan la prueba para requisitos colorimétricos, los cuadriláteros representan el rango que tiene la cinta para pasar los requerimientos colorimétricos de acuerdo con la tabla 1.

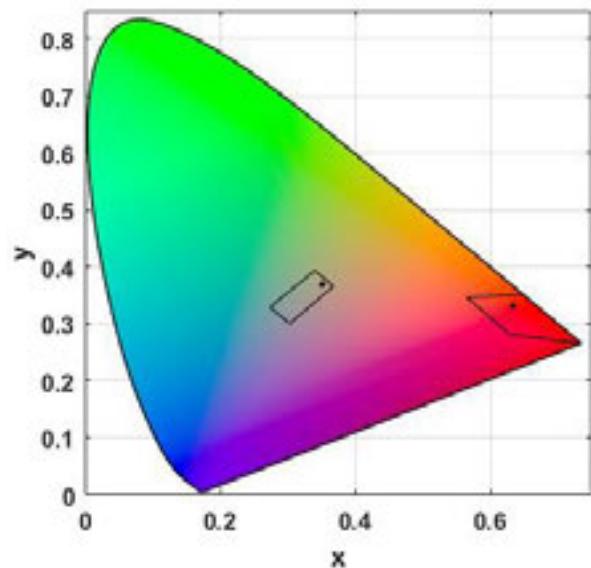


Fig. 8 Diagrama de cromaticidad CIE 1931 con rangos de aceptación para las cintas.

Las coordenadas de color con los respectivos aportes a la incertidumbre debidos a la longitud de onda y a la intensidad se presentan en la tabla 2. La incertidumbre de una serie de mediciones es bastante pequeña con respecto a la de la prueba de reproducibilidad, ya que corresponde a un solo día y fuente; Esta es aceptable con respecto a los rangos para pasar la prueba.

Tabla 2. Coordenadas de color con su respectiva incertidumbre (a una desviación estándar) para las cintas roja y blanca testadas.

	Blanco		Rojo	
	X	y	x	Y
Cromaticidad CIE 1931	0,3512	0,3685	0,6332	0,3308
Incertidumbre Intensidad	0,0002	0,0004	0,0001	0,0001
Incertidumbre Longitud de onda	0,0010	0,0010	0,0006	0,0003
Incertidumbre Total	0,0012	0,0013	0,0007	0,0003

La figura 9 muestra más de cerca la región de aceptación para las cintas, se muestran las coordenadas de color de los datos medidos, es decir los espectros de reflectancia de la figura 7. El software desarrollado también presenta una ellipse de incertidumbre, en ambos casos la incertidumbre es muy pequeña en comparación del rango de aceptación de la prueba.

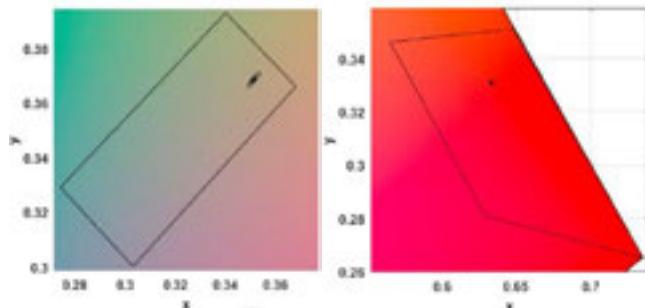


Fig. 9 Acercamiento del diagrama de cromaticidad en los cuadriláteros de aceptación: Zoom de la figura 8.

## 5. Recomendaciones y conclusiones

Se ha implementado la prueba de color para cintas retroreflectivas para conocer si cumple con los criterios exigidos por la norma ASTM D4956-19, a partir de un montaje con sonda bifurcada, que permite al laboratorio no replicar el iluminante requerido. Se ha validado la reproducibilidad de la prueba además se reporta el valor de incertidumbre correspondiente a las mediciones basado en el enfoque de derivada parcial, de acuerdo con la GUM [8,9,10]. Se presenta un estudio de reproducibilidad del montaje propuesto en donde se determina que variaciones pueden afectar a la varianza, de esa forma se determinan parámetros del montaje, además la incertidumbre de las mediciones es pequeña en comparación de las magnitudes de los rangos de aceptación. De esta forma se permite prestar un servicio hasta el momento carente al país, asociado a la certificación de los criterios básicos de las cintas, por supuesto de gran importancia a nivel metrología y aporte a la seguridad vial.

Para el desarrollo de la prueba es sumamente importante usar una fuente de excitación, cuyo espectro tenga componente espectral en todo el rango visible de tal forma que la relación, señal a ruido del equipo haga la que señal de ruido negro sea insignificante, por supuesto, esto va acompañado de guardar el tiempo suficiente para la estabilización térmica de los equipos, de tal forma que la prueba sea más estable, y que el ruido negro no cambie considerablemente. Además, se debe verificar que el espectro de reflectancia no posea valores negativos prominentes.

Finalmente, se ha desarrollado una herramienta de software que automatiza los cálculos y el criterio de aceptación de la prueba, además permite al usuario cambiar al usuario diferentes parámetros de la prueba y muestra resultados finales e intermedios de esta.

## 6. Referencias

- [1] American Society of Testing Materials - ASTM D4956-19 “Standard Specifications for Retroreflective Sheeting for Traffic Control”
- [2] Resolución 3246 del 2018 del Ministerio de Transporte de Colombia - reglamenta la instalación y uso obligatorio de las cintas retroreflectivas en los vehículos de carga y transporte escolar.
- [3] Norma técnica colombiana - NTC 4739-2016 “LÁMINAS RETRORREFLECTIVAS PARA CONTROL DE TRÁNSITO”
- [4] American Society for Testing and Materials – ASTM E811 “Measuring Colorimetric Characteristics of Retroreflectors Under Nighttime Conditions”
- [5] Norma técnica colombiana – NTC 6124 “DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RETRORREFLEXIÓN DE LÁMINAS RETRORREFLECTIVAS MEDIANTE GEOMETRÍA COPLANAR”
- [6] Gardner JL. Uncertainty estimation on colour measurement. *Color Res Appl*. 2000; 25:349–355.
- [7] CIE Technical Committee 1-48, “Recommendations concerning the calculation of tristimulus values and chromaticity coordinates,” in *Colorimetry*, CIE Tech. Rep. CIE 15:2004, 3<sup>rd</sup> ed. (Commission Internationale de l’Eclairage, 2004), pp. 12–16.
- [8] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 2008. Evaluation of Measurement Data—Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement—Propagation of distributions using a Monte Carlo method Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008
- [9] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization, JCGM 100:2007.
- [10] CIE 198-SP2:2018, "Determination of measurement uncertainties in photometry supplement 2: spectral measurements and derivative quantities", ISBN: .978-3-902842-11-4, DOI: 10.25039/TR.198SP2.2018
- [11] Commission International de l’Eclairage. Method of characterising the performance of radiometers and photometers. CIE 53–1982.
- [12] Joint Committee for Guides in Metrology, “International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms” (VIM) (BIPM, 2008).

## 7. Biografías

### Laura C. Parada Aguilar.

Ingeniera Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, actualmente trabaja en el laboratorio de Ensayos Eléctricos industrial LABE, auxiliar de investigación para el laboratorio de visión y color.

### Miguel Ángel Chávez.

Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, estudiante de maestría en Ingeniería Eléctrica y Auxiliar de investigación en el laboratorio de Ensayos Eléctricos industrial LABE.

### Francisco Amórtegui G.

Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, por mas de 18 años ha sido el jefe técnico de ensayos en el Laboratorio de Ensayos eléctricos e industriales LABE, su actividad docente se enfoca en las áreas de Alta tensión, Campos electromagnéticos, Puestas a tierra e Iluminación.

### Jesús M. Quintero Q.

Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad. En 2015 obtuvo su doctorado en la Universitat politecnica de Catalunya, UPC – Barcelona Tech, Especialista en Automatización y Control Industrial de la Universidad Nacional de Colombia en 2007, Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia en 1992. Su investigación se centra en medición, materiales luminiscentes y la calidad del color de las fuentes de luz. Actualmente ostenta el cargo de director general del laboratorio de Ensayos Eléctricos industrial LABE y director del grupo de investigación MATISSE.

# Diseño de iluminación de un edificio de oficinas teniendo en cuenta el estímulo circadiano basado en la guía UL DG 24480

Jesús M. Quintero<sup>1,a</sup>, Jesús D. Roa<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional sede Bogotá, Colombia

<sup>a</sup> [jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co) <sup>b</sup> [jeroaa@unal.edu.co](mailto:jeroaa@unal.edu.co)

**Resumen**— Este artículo presenta el diseño y evaluación de iluminación de las áreas de trabajo de un edificio de oficinas, teniendo en cuenta los efectos no visuales que puede generar la iluminación de acuerdo a la guía de diseño UL 24480 enfocada en los estímulos circadianos. La guía presenta las pautas para integrar la iluminación como un conjunto que incluye la salud y el bienestar de las personas que laboran en espacios cerrados como oficinas, permitiendo reducir síntomas comunes asociados con la falta de sueño, la somnolencia y la depresión. Para llevar a cabo este trabajo, se modeló la edificación con todas sus características arquitectónicas; Asimismo, se calculó el aporte de iluminación vertical de la luz día y artificial en el plano de trabajo de 1.15 metros, a la altura del ojo. Seguidamente, se calculó el estímulo circadiano, el cual representa la efectividad obtenida de la irradiancia espectralmente ponderada en la córnea. Finalmente, este trabajo logró cumplir con el parámetro de estímulo circadiano propuesto por la guía de UL 24480 para todas las oficinas del edificio a partir de la fuente lumínica propuesta y el aporte de luz natural.

**Palabras clave:** efectos no visuales, guía de diseño Ul 24480, estímulo circadiano, beneficios en la salud.

**Abstract**- This article presents the design and evaluation of lighting in the work areas of an office building, taking into account the non-visual effects that lighting can generate according to the UL 24480 design guide focused on Circadian Stimulus. The guide presents the guidelines for integrating lighting as a whole that includes the health and well-being of people who work in closed spaces such as offices, allowing the reduction of common symptoms associated with lack of sleep, drowsiness and depression. To carry out this work, the building was modeled with all its architectural characteristics; Likewise, the contribution of vertical illuminance of daylight and artificial light was calculated in the 1.15-meter work plane, at eye level. Next, the circadian stimulus was calculated, which represents the effectiveness obtained from the spectrally weighted irradiance in the cornea. Finally, this work was able to comply with the circadian stimulus parameter proposed by the UL 24480 guide for all the offices in the building from the proposed light source and the contribution of natural light.

**Key Words:** Non-visual effects, Ul 24480 design guide, Circadian Stimulus, health benefits.

## 1. Introducción

Durante el transcurso del tiempo, los humanos evolucionaron siguiendo patrones de luz natural. No obstante, la luz artificial nos ha separado del medioambiente, a causa de las jornadas laborales durante el día. Desde hace más de 2 décadas, se ha venido investigando un nuevo concepto que es el resultado de integrar la iluminación como un conjunto que incluya la salud y el bienestar, para obtener beneficios visuales y biológicos.

En contexto, los organismos vivos como las plantas y animales cuentan con un ritmo circadiano, es decir, presentan diferentes comportamientos, siendo el más importante el ciclo de luz día y oscuridad durante las 24 horas. En el caso particular

de los humanos, transforma la entrada de radiancia de luz a la pupila en señales neuronales que promueven la sincronización del reloj biológico, sin el cual podríamos experimentar disminuciones en las funciones fisiológicas o pérdida del sueño [1].

En contraste con lo anterior, la iluminación basada en los ritmos circadianos difiere del diseño arquitectónico tradicional. Como es conocido, su enfoque está centrado en desarrollar un sistema que sólo involucra los niveles de iluminación, un bajo deslumbramiento, reproducción óptima de color, la seguridad y apariencia del entorno. Si bien es importante tener en cuenta estas consideraciones, también es necesario considerar los efectos no visuales de la luz en el diseño de un sistema de iluminación [2].

Este trabajo involucra el diseño de un sistema de iluminación teniendo en cuenta los ritmos circadianos, integrando los aportes de luz natural y artificial que en otras palabras permitirá

mejorar el sueño durante la noche y mantener el estado de alerta durante el día. Este estudio considera la métrica propuesta por el estándar UL *Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People* el cual da las pautas para el cálculo del factor CS Circadian Stimulus que a su vez presenta un desempeño clave en el diseño de iluminación considerando los ritmos circadianos [3].

## 2. Contexto

Las respuestas visuales parten desde la detección de la radiancia lumínica que entra a la pupila del ojo. Una vez las señales llegan a la retina, pasan por los fotorreceptores conos y bastones capaces de convertir la radiancia en mensajes eléctricos y posteriormente viajan a través del nervio óptico hasta el cerebro, encargado de darle lógica a las imágenes. Sin embargo, en la retina no solo existen estos dos fotorreceptores comúnmente conocidos; en las últimas 2 décadas se descubrió que hay otro fotorreceptor en la retina llamado célula ganglionar, conocidos como *intrinsically photosensitive retinal ganglion cell (ipRGC)* y aunque no están directamente relacionados con la formación de imágenes, sí actúan como detectores de luz [4], [5]. Las células ganglionares no se encuentran al mismo nivel de los conos y los bastones utilizados por el sistema visual, como se aprecia en la Imagen 1. La fotosensibilidad se basa en el fotopigmento melanopsina

[6] y su campo de acción está asociado con las longitudes de onda azules [7].

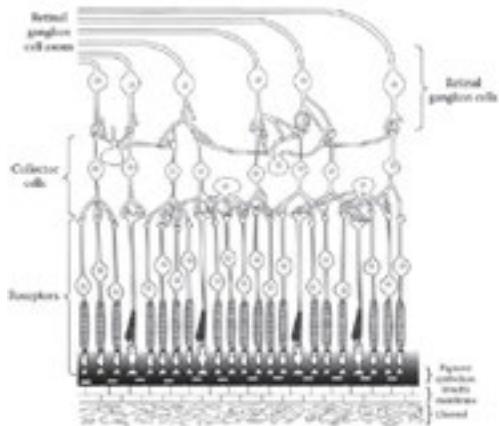


Imagen 1. Fotorreceptores de la retina del ojo humano. Tomado de: *After Sekular, R. and Blake, R., Perception, 3rd edn., McGraw-Hill, New York, 1994. En (Human Factors in Lighting Third Edition, Peter R. Boyce)*

Estudios realizados en mamíferos como ratones, dieron cuenta que los ipRGCs son solamente el 1% y 2% de las células ganglionares de la retina [8]. Asimismo, los ipRGCs son menos sensibles a la radiación de luz que los conos y los bastones [9]. En consecuencia, estos fotorreceptores necesitan mayor cantidad de fotones para ser excitados [5].

los humanos tenemos un reloj biológico ubicado en el cerebro, puntualmente en el hipotálamo se encuentra el núcleo supraquiasmático el cual se encarga de controlar los ritmos circadianos y es el responsable de sincronizar el tiempo de muchos eventos fisiológicos diferentes en el cuerpo, como la reparación del ADN y la producción de hormonas [10]. Físicamente, las señales de luz percibidas por los ipRGCs son enviadas al núcleo supraquiasmático, éstas recorren el cerebro incluso a la glándula pineal. Posteriormente, la glándula pineal permite regular o no la producción de melatonina, hormona que produce sensación de sueño en ausencia de la luz [1].

#### A. Luz circadiana

El reloj circadiano ubicado en el núcleo supraquiasmático está asociado directamente con los cambios de entrada de radiancia de luz que inciden en la retina. Las señales de luz convertidas en señales neuronales que viajan al reloj biológico se denominan fototransducción circadiana. El estímulo de luz física que se transforma en señales neuronales a través de la fototransducción circadiana se denomina luz circadiana efectiva. Para caracterizar matemáticamente y especificar la luz circadiana efectiva en aplicaciones arquitectónicas, es importante tener un modelo computacional de fototransducción circadiana [11].

Realizar mediciones sobre el impacto de la luz y la oscuridad en el reloj circadiano es complejo y costoso, por los

que gran parte de lo que se conoce del tema proviene de los estudios asociados al efecto de la luz nocturna en la hormona melatonina, hormona que se produce en la noche en ausencia de la luz.

#### B. Estímulo circadiano CS

La marca de certificación Underwriters Laboratories UL en diciembre de 2019 presentó la guía práctica para el diseño de iluminación circadiana. La métrica se basa en el cálculo del estímulo circadiano CS desarrollada por *Lighting Research Center (LRC)* del instituto politécnico Rensselaer [3].

El estímulo circadiano CS es la efectividad calculada de la irradiancia espectralmente ponderada en la córnea desde el umbral ( $CS = 0.1$ ) hasta la saturación ( $CS = 0.7$ ), suponiendo una duración fija de exposición de 1 hora. La herramienta propuesta por LRC se encuentra en la web, ésta es capaz de convertir los valores de iluminancia vertical fotópica en el factor CS. La guía recomienda un factor CS de al menos 0.3 durante 2 horas en el transcurso del día, que en otras palabras se podría describir como factor para mantener el estado de alerta en las personas [3].

#### C. Guía de diseño: Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People [3].

La práctica de los diseños de iluminación actual no considera los efectos no visuales de la iluminación en los seres humanos. Esta guía proporciona las pautas de diseño donde se integra los ritmos circadianos y de esta forma las personas que habitan las edificaciones puedan mejorar sus actividades durante el día y conciliar el sueño durante la noche. Es pertinente aclarar que esta guía no considera procedimientos para personas que laboran durante la noche.

##### ❖ Pautas para el diseño de iluminación

• **Paso 1:** Se debe establecer un mínimo de 2 horas de luz circadiana durante el día, dicho de otra forma, esta luz circadiana es la que suprimiría la producción de melatonina en la noche, en un 30 % logrando que las personas se mantengan más activas durante el día. Existen 3 criterios donde se relaciona el factor estímulo circadiano CS que es la medida del impacto de efectividad de la radiación óptica incidente en la retina que puede suprimir la melatonina.

Para los horarios laborales entre las 7:00 am y 4:00pm el estado de alerta debe ser máximo, por lo tanto, el CS debe ser igual o mayor a 0.3. Después de las 4:00 pm se presenta un estado de transición donde se debe mantener el mismo valor o debe ser inferior. Desde las 5:00 pm hasta las 7:00 pm el factor CS debe ser igual o menor a 0.2 y durante la noche, es decir, después de las 8:00 pm el CS debe ser de 0.1.

Para nuestro caso de estudio, la ocupación del edificio es de 7:00 am a 5:00pm. Por lo tanto, sólo se considera el estímulo CS de 0.3.

- **Paso 2:** Este paso da cuenta de la elección de la luminaria y la importancia de conocer la distribución luminosa, como bien se había mencionado anteriormente, el campo de acción del estímulo circadiano se representa mejor en el plano de iluminancia vertical. Finalmente, la distribución luminosa nos permitirá conocer la relación del aporte de iluminancia vertical sobre la iluminancia horizontal.

**Paso 3:** En este paso se debe seleccionar la distribución espectral de la fuente lumínica, esta medida alguno fabricantes la proporcionan, de lo contrario se podría medir en un laboratorio con la ayuda del equipo espectrofotómetro.

- **Paso 4:** Una vez escogida la fotometría y el espectro de luz de la misma, se puede iniciar el cálculo de iluminancia vertical (Ev) en un software para el diseño de iluminación. El plano de cálculo se recomienda situar a una altura entre 0.9 y 1.3 metros, es decir a la altura del ojo.

- **Paso 5:** En este paso ya podemos calcular el estímulo circadiano CS con la ayuda de la calculadora relacionada en el siguiente enlace: <https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/>.

- **Paso 6:** Debemos determinar si el diseño cumple con los requisitos del paso 1, en este caso si el valor del CS es igual o superior a 0.3. De no cumplirse el valor óptimo, se debe aumentar la cantidad de luminarias o buscar una nueva fuente lumínica que nos asegure el valor del estímulo circadiano.

### 3. Descripción de la edificación y fuente lumínica.

En la Imagen 2 se aprecia la edificación donde se realizó el estudio con enfoque en la iluminación circadiana. El edificio cuenta con dos plantas con un área aproximada de 1300 m<sup>2</sup> los cuales están distribuidos en oficinas de trabajo con computadores, salas de reuniones y salas de juntas.

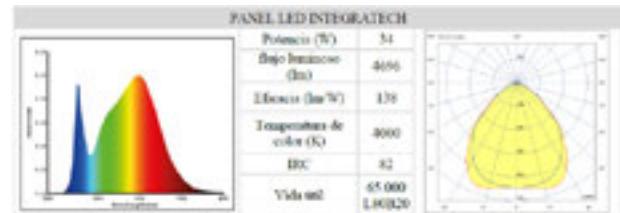


Imagen 2. Edificio de estudio. Tomado de:  
<http://arquitecturamodernaenbogota.blogspot.com/2010/08/cade-universidad-nacional-decolombia.html>

El mobiliario es moderno, cuenta con espacios abiertos, transparentes, que permiten la entrada de luz natural. Se encuentra ubicado en las coordenadas: latitud 4.63°, longitud -74° y su fachada principal tiene una orientación hacia el norte de 310°.

En la **Tabla 1**, se describen las características de la fuente lumínica de estudio. Así como se indican en las pautas con enfoque de diseño de iluminación circadiana, es necesario conocer el espectro de luz de y la fotometría de la fuente.

Tabla 1. Características de la fuente lumínica de estudio.



### 4. Metodología

El proyecto se desarrolló con base a las pautas requeridas por la guía de diseño *Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People* propuesta por UL.

Una vez realizado el estudio de la guía, se llevó a cabo la exploración de fuentes lumínicas teniendo en cuenta su espectro y fotometría. Posteriormente, se modeló la edificación en el software Dialux evo 9.0 con todas sus características arquitectónicas, como se aprecia en la Imagen 3.

Seguidamente, se calculó los aportes de iluminancia vertical de luz natural para un día nublado y los aportes de luz artificial, considerando la orientación del edificio, en el plano de trabajo de 1.15 metros. Finalmente, se ingresaron los datos en la calculadora propuesta por la guía UL 24480 para calcular el factor de estímulo circadiano CS. Asimismo, se tuvo en cuenta los parámetros de diseño tradicionales como iluminancia horizontal, uniformidad y deslumbramiento UGR.



Imagen 3. Modelo arquitectónico en Dialux evo 9.0.

## 5. Resultados

### D. Resultados iluminancia vertical luz día

En las Figuras 1 y 2, se muestran los resultados de la iluminancia vertical en el plano de trabajo de 1.15 metros (la altura del ojo) durante el día para el piso 1 y 2 respectivamente.

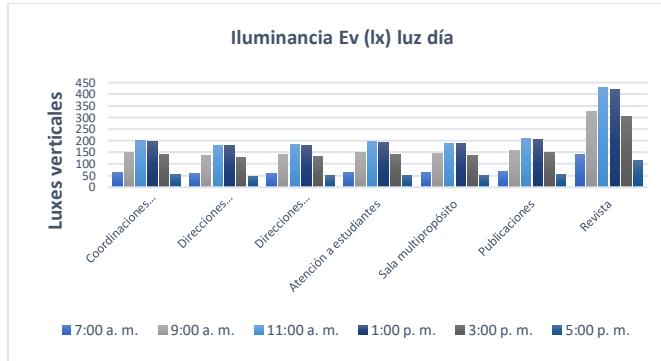


Figura 1. Resultados iluminancia vertical piso 1.

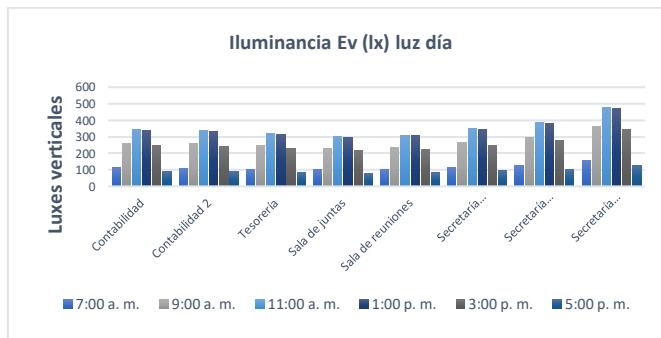


Figura 2. Resultados iluminancia vertical piso 2.

### E. Resultados iluminancia vertical fuente artificial

En las Figuras 3 y 4, se muestran los resultados de la iluminancia vertical en el plano de trabajo de 1.15 metros (a la altura del ojo) para la fuente lumínica artificial.

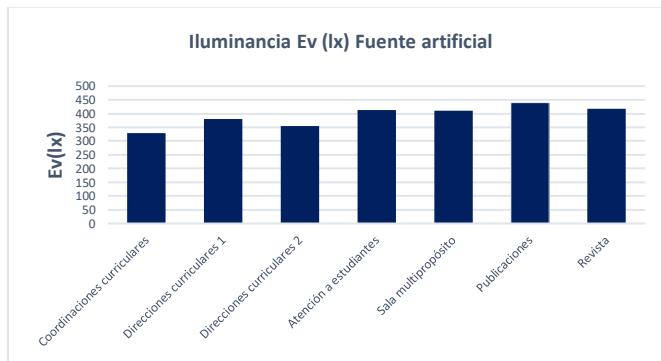


Figura 3. Resultados iluminancia vertical piso 1.

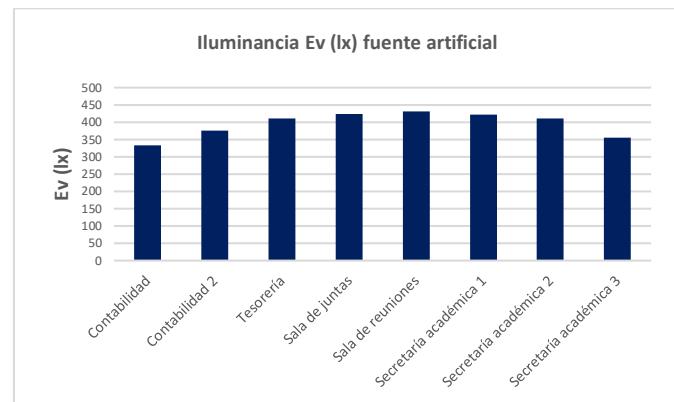


Figura 4. Resultados iluminancia vertical piso 2.

### F. Resultados iluminancia vertical fuente artificial.

Finalmente, una vez calculada la iluminancia vertical en todas las áreas propuestas, se calculó el estímulo circadiano a partir de la calculadora propuesta por la guía UL 24480.

En la Figura 5 se aprecia el cálculo del estímulo circadiano al integrar los espectros del iluminante D65 con una iluminancia vertical de 65.4 lx, y el espectro de la fuente INTEGRATECH con un aporte de iluminancia vertical de 329 lx, el resultado del estímulo circadiano es 0.303 valor ideal recomendado por la guía UL 24480.



Figura 5. Cálculo del estímulo circadiano. Realizado:  
<https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/>

En las figuras de la 6 hasta la 10 se encuentran los resultados del estímulo circadiano incluyendo el aporte



Figura 6. Resultado estímulo circadiano Coordinaciones curriculares.



Figura 7. Resultado estímulo circadiano Direcciones curriculares.



Figura 8. Resultado estímulo circadiano Direcciones curriculares 2.



Figura 9. Resultado estímulo circadiano Atención a estudiantes.



Figura 10. Resultado estímulo circadiano Sala multipropósito.

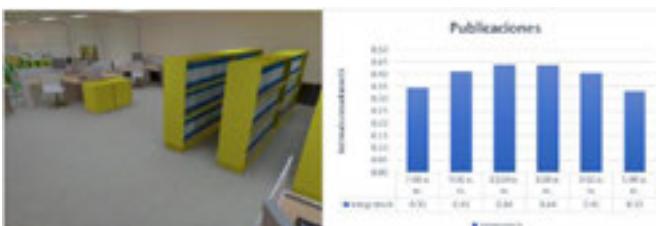


Figura 11. Resultado estímulo circadiano Sala multipropósito.

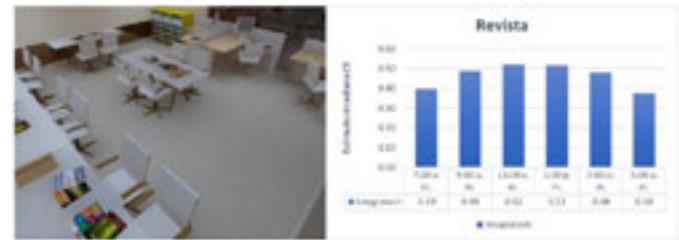


Figura 12. Resultado estímulo circadiano Revista.

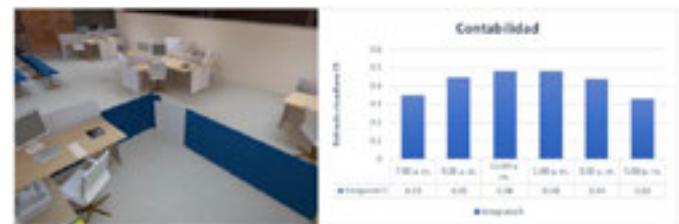


Figura 13. Resultado estímulo circadiano Contabilidad.



Figura 14. Resultado estímulo circadiano Contabilidad 2.

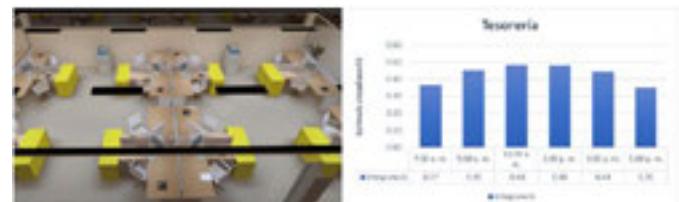


Figura 15. Resultado estímulo circadiano Tesorería.



Figura 16. Resultado estímulo circadiano Sala de reuniones.



Figura 17. Resultado estímulo circadiano Sala de reuniones.

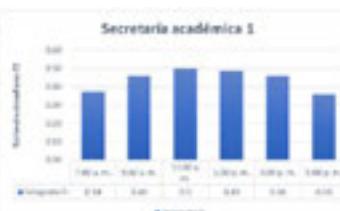


Figura 18. Resultado estímulo circadiano Secretaría académica 1.

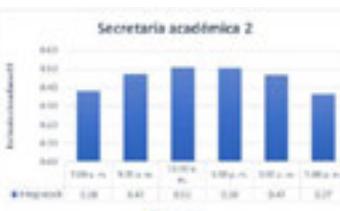


Figura 19. Resultado estímulo circadiano Secretaría académica 2



Figura 20. Resultado estímulo circadiano Secretaría académica 3

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La iluminación circadiana permite mantener el estado de alerta durante el día y mejorar el sueño durante la noche; este trabajo logró cumplir con el parámetro de estímulo circadiano propuesto por la guía de UL 24480 para todas las oficinas del edificio a partir de la fuente lumínica propuesta y el aporte de luz natural.

La iluminación para el sistema circadiano es bastante diferente del diseño de iluminación arquitectónico tradicional. En términos generales, el último enfoque se ha centrado principalmente en la visibilidad y las preocupaciones relacionadas, como la reducción del deslumbramiento, la reproducción del color, la seguridad y la apariencia del espacio. Si bien es importante estas consideraciones, el diseño para los efectos no visuales propuesto por la guía de UL 24480, podría traer beneficios biológicos que no considera el diseño tradicional.

La arquitectura del edificio se diseñó teniendo en cuenta la entrada de luz natural, esto permite que parámetro de estímulo circadiano sea ideal.

La guía de diseño se enfoca en personas que trabajan durante el día, para cumplir con los criterios establecidos se recomienda

que después de las 5:00 pm se disminuya la exposición a la luz y en efecto, se pueda reducir el estímulo circadiano para mejorar el sueño durante la noche.

La guía recomienda utilizar fuentes de temperatura de color CCT de 3000 K con bajas intensidades de luz después de las 5:00 pm, debido a que su espectro de luz tiene un menor aporte en el filtro melanópico, permitiendo no activar el fotorreceptor melanopsina durante la noche, que, en otras palabras, permitirá la salida de la hormona melatonina, relacionada con el sueño.

En este trabajo no se tuvo en cuenta el aporte de iluminancia de las pantallas de los computadores para el cálculo del estímulo circadiano, sin embargo, se recomienda para futuras investigaciones integrarlo.

La información de las distribuciones espectrales de las luminarias muy pocos fabricantes la comparten, se recomienda socializar la importancia de la iluminación circadiana a los fabricantes.

La guía UL 24480 recomienda realizar la evaluación en su calculadora de estímulo circadiano de cada fuente lumínica, con la finalidad de verificar el aporte del estímulo circadiano.

## 5. Referencias

- [1] Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting*. Crc Press.
- [2] Figueiro, M. G., Gonzales, K., & PeDler, D. (2016). *Designing with circadian stimulus*. LD+A, 8, 30-34.
- [3] UL. 2019. UL RP 24480, Recommended Practice and Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active
- [4] Berson, D. M., Dunn, F. A., & Takao, M. (2002). Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 295(5557), 1070-1073.
- [5] Berson, D. M. (2003). Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors. *TRENDS in Neurosciences*, 26(6), 314-320.
- [6] Qiu, X., Kumbalasiri, T., Carlson, S. M., Wong, K. Y., Krishna, V., Provencio, I., & Berson, D. M. (2005). Induction of photosensitivity by heterologous expression of melanopsin. *Nature*, 433(7027), 745-749.

- [7] Berson, D. M. (2007). Phototransduction in ganglion-cell photoreceptors. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 454(5), 849-855.
- [8] Hattar, S., Liao, H. W., Takao, M., Berson, D. M., & Yau, K. W. (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science*, 295(5557), 1065-1070.
- [9] Schmidt, T. M., Do, M. T. H., Dacey, D., Lucas, R., Hattar, S., & Matynia, A. (2011). Melanopsin-positive intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: from form to function. *Journal of Neuroscience*, 31(45), 16094-16101.
- [10] Klein, D.C., Moore, R.Y., and Reppert, S.M. (1991). Suprachiasmatic Nucleus: The Mind's Clock (New York: Oxford University Press).
- [11] Figueiro, M. G., Kalsher, M., Stevenson, B. C., Heerwagen, J., Kampschroer, K., & Rea, M. S. (2019). Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research & Technology*, 51(2), 171-183.

# Transmitancia del ojo humano y percepción de luminosidad<sup>1</sup>

Oscar U Preciado<sup>1,2,a</sup>, Andrés Martín<sup>2</sup>, Eduardo Manzano<sup>1,2</sup>, Peter Hanselaer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión (DLLyV-FACET-UNT), Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV-UNT-CONICET), Argentina

<sup>3</sup> Light&Lighting Laboratory, KU Leuven, Bélgica

<sup>a</sup> [upreciado@herrera.unt.edu.ar](mailto:upreciado@herrera.unt.edu.ar).

**Resumen**— A medida que envejecemos, la densidad óptica del cristalino se incrementa, lo cual implica una reducción de su transmitancia. Sin embargo, esta disminución no es la misma para todas las longitudes de onda.

El objetivo de este trabajo es evaluar si la percepción de la luminosidad se ve afectada por el cambio de transmitancia del ojo con la edad. Para ello, se realizó un experimento de igualación de luminosidades entre estímulos de luz azul y estímulos de luz roja sobre un fondo negro. Se seleccionaron dos grupos de observadores de distinta edad: 20-30 años y 65 años o más. La luminosidad de todos los estímulos fue calculada mediante el modelo CAM15u.

Se encontró una diferencia significativa en la percepción de luminosidad para los estímulos de luz azul entre los dos grupos de edad, en términos generales, los adultos mayores perciben como menos luminosos a los estímulos con gran emisión de luz de longitudes de onda cortas, lo cual podría ser una consecuencia de la pérdida de transmitancia con la edad.

**Palabras clave.** *Transmitancia del ojo, envejecimiento del ojo, percepción de luminosidad.*

**Abstract.** As we age, the optical density of the eye lens increases, which implies a reduction in its transmittance. However, this decrease is not the same for all wavelengths.

The aim of this work is to evaluate whether the perception of brightness is affected by the change in transmittance of the eye with age. For this purpose, an experiment of brightness matching between blue-light stimuli and red-light stimuli on a black background was carried out. Two groups of observers of different ages: 20-30 years old and 65 years old or more were selected. The brightness of all the stimuli were calculated using the CAM15u model.

It was found a significant difference in the perception of brightness for blue light stimuli between the two age groups. In general terms, older adults perceive stimuli with high emission of light in short wavelengths as less bright, which could be a consequence of loss of transmittance with age.

**Key Words.** *Eye transmittance, eye aging, brightness perception.*

## 1. Introducción

La cantidad de luz que llega a la retina es uno de los aspectos fundamentales para que el sistema visual humano funcione adecuadamente. Los factores que la determinan son: la cantidad de luz que incide en el ojo, el tamaño de la pupila y la absorción de la luz al pasar por el ojo [1].

La forma en que se ilumina un espacio, la reflexión de las superficies, junto con la dirección de la visión, determinan la cantidad de luz que incide en el ojo. El tamaño de la pupila varía con la cantidad de luz, abriéndose para admitir más luz cuando hay poca y cerrándose cuando hay mucha. Sin embargo, la relación entre el área máxima y mínima de la pupila disminuye con la edad, la máxima disminuye más que

la mínima [1]. Esto significa que los adultos mayores tienen una menor capacidad de compensar los bajos niveles de iluminación abriendo sus pupilas respecto de los jóvenes.

En cuanto a la absorción del ojo, para llegar a la retina, la luz debe pasar a través de la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. Mientras que la absorción y la dispersión en los humores pueden tener efectos muy menores, la córnea absorbe casi toda la radiación por debajo de unos 300 nm. Aunque en la literatura se sugiere que la transmitancia de la córnea varía ligeramente con la edad, su transmitancia es alta y varía sólo lentamente en el extremo azul del espectro visible [2].

Mucho más importantes son los efectos debidos al cristalino. El cristalino transmite progresivamente menos luz visible y particularmente menos luz azul a medida que envejece [3], [4].

La transmitancia espectral del ojo humano no es uniforme respecto de la longitud de onda a lo largo del espectro visible. El ojo presenta una mayor absorción en la región de longitudes de onda cortas mientras que, en las longitudes de onda más largas, la transmitancia es superior al 80% (Fig. 1).

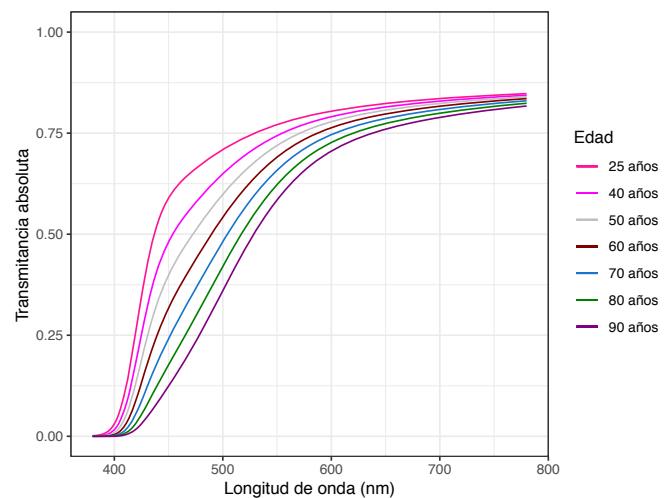


Fig 1. Variación de la transmitancia espectral del ojo humano con la edad (elaboración propia con base en CIE 203:2012 [5]).

<sup>1</sup> En este trabajo, con el término "luminosidad" se hace referencia al concepto en inglés "brightness", utilizado en el área de percepción visual.

Además, la disminución de la transmitancia con la edad tampoco es la misma en magnitud para todas las longitudes de onda; esta reducción es considerablemente más importante para las longitudes de onda cortas mientras que, en las longitudes de onda más largas, la transmitancia es casi independiente de la edad (Fig. 1) [5].

Para ilustrar con mayor detalle el impacto del cambio de transmitancia con la edad para las longitudes de onda corta, en la Fig. 2 se graficó la tendencia de la transmitancia relativa del ojo con la edad (relativa al ojo de una persona de 25 años), de acuerdo con el reporte técnico de la CIE 203:2012 [5], para tres intervalos de longitud de onda.

Si bien la disminución total (intervalo 380 nm a 780 nm) de la transmitancia con la edad parece pequeña (alrededor de 14% para una persona de 70 años), se muestra que para el intervalo de longitudes de onda cortas (380 nm a 550 nm), existe una disminución muy pronunciada de la transmitancia del ojo. Por ejemplo, para una persona de 70 años existe una disminución de alrededor del 40% en la cantidad de luz que llegará a la retina para esas longitudes de onda. Por otro lado, para las longitudes de onda largas (550 nm a 780 nm), la disminución para una persona de 70 años es de sólo un 5%.

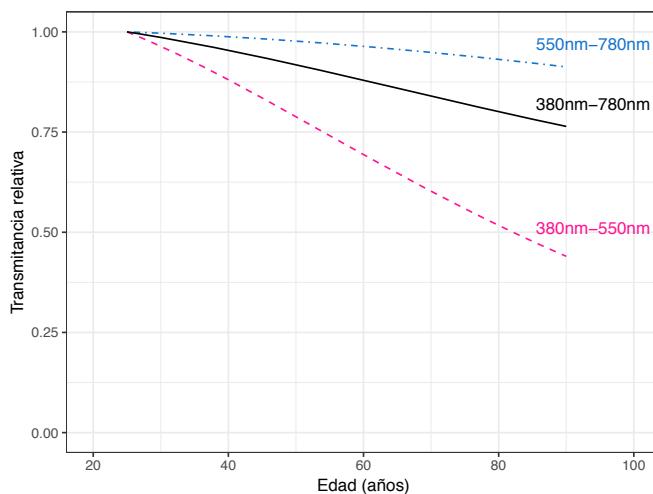


Fig. 2. Cambios en la transmitancia del ojo con la edad para diferentes intervalos de longitudes de onda (relativos a una edad de 25 años, elaboración propia con base en CIE 203:2012 [5]).

A diferencia de la luminancia, que es una medida objetiva de la radiancia ponderada respecto de la función de eficiencia luminosa del ojo humano,  $V(\lambda)$  [6], la luminosidad se define como el atributo perceptual según el cual, un determinado estímulo visual parece ser más o menos intenso [7], o según el cual la zona en la que se presenta un estímulo visual parece emitir más o menos luz [8].

Es de esperarse que tal reducción de la transmitancia ocular en las partes bajas del espectro visible con la edad, altere la excitación de los conos y, por tanto, la percepción de la luminosidad cuando la luz observada tenga una importante

emisión de longitudes de onda corta. Sin embargo, no puede soslayarse que el sistema visual puede tener mecanismos para compensar estas pérdidas tal como lo hace con la percepción de color (constancia de color) [9]–[11].

Por esta razón, es necesario realizar experimentos para determinar si la percepción de la luminosidad se ve afectada por la edad del observador y si estos cambios pueden explicarse por la reducción de la transmitancia del ojo humano.

Con tal objetivo, se diseñó un experimento en el que observadores jóvenes y adultos mayores, debían igualar la luminosidad de un estímulo de luz azul con la luminosidad de un estímulo de luz roja, ambos presentados sobre un fondo negro.

## 2. Metodología

El experimento se basa en la hipótesis de que, si se presenta un estímulo de luz con una alta emisión en las partes bajas del espectro visible a un adulto mayor y a un joven, el adulto mayor percibirá al estímulo como menos luminoso. Sin embargo, para llevar a cabo esta comparación, es necesario tener otro estímulo visual para el que, presumiblemente, ambos observadores tendrían la misma (o muy semejante) percepción de luminosidad.

De acuerdo con los cambios en la transmitancia del ojo con la edad mostrados en la Fig. 3, la luz de un estímulo rojo tendría poca diferencia en absorción en el ojo para observadores jóvenes y adultos mayores. Mientras que habría una diferencia considerable para un estímulo de luz azul.

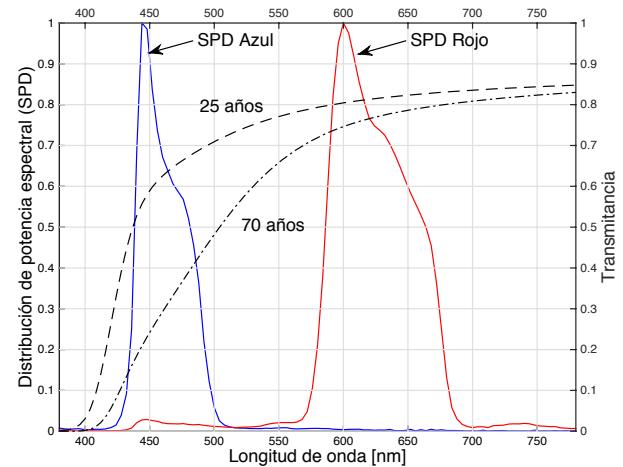


Fig. 3. Distribuciones de potencia espectral (SPD) normalizadas de dos estímulos visuales (azul y rojo). En el segundo eje de ordenadas se muestra también la transmittancia espectral del ojo humano para una persona de 25 años y una de 70 años en líneas discontinuas.

Dada esta situación, se planteó un experimento en el que se presentaría a dos grupos de observadores (jóvenes y adultos mayores), una serie de escenas donde debían igualar la

luminosidad entre un estímulo de luz roja y uno de luz azul (Fig. 4).

Si la hipótesis es verdadera, al presentar el estímulo rojo de referencia, ambos observadores, el joven y el adulto mayor, lo verían prácticamente con la misma luminosidad. Si se les solicita entonces que igualen la luminosidad del estímulo rojo mediante el ajuste de la luminosidad del estímulo azul, la luminosidad de igualación seleccionada por los adultos mayores sería mayor a la de los observadores jóvenes. A la inversa, en caso de que la referencia fija fuese el estímulo de luz azul y tuvieran que ajustar la luminosidad del estímulo de luz roja, los adultos mayores seleccionarían una luminosidad menor que la de los observadores jóvenes puesto que en este caso verían a la referencia azul como menos luminosa.

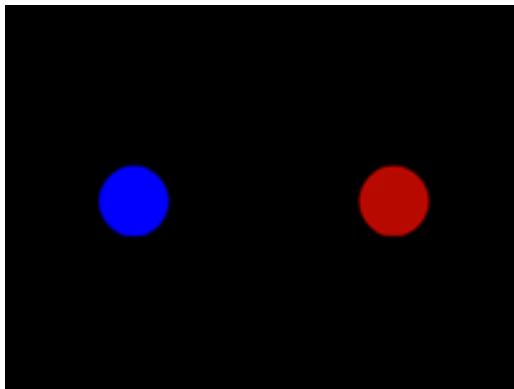


Fig 4. Ejemplo del tipo de escenas presentadas a los participantes del experimento. Mientras que uno de los estímulos permanece fijo, el observador puede ajustar la luminosidad del otro estímulo hasta que considere que ambos son igual de luminosos.

### 3. Arreglo experimental

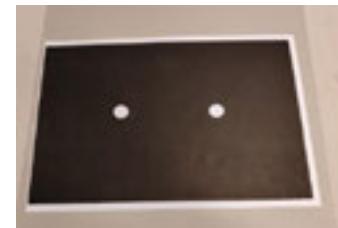
Como se mencionó anteriormente, se llevó a cabo un experimento para investigar el efecto del envejecimiento del ojo en la percepción de la luminosidad. Este experimento consistió en proyectar dos estímulos de luz circulares con un campo de visión (FOV) de  $2^\circ$  sobre un fondo negro (Fig. 5) usando un proyector Epson VS335W 3LCD WXGA.

#### A. Los estímulos

Los estímulos corresponden a los colores primarios rojo y azul del proyector y fueron generados a través de un script escrito en MATLAB utilizando el paquete de funciones llamado Psychtoolbox-3 [12]. Las longitudes de onda máximas de los dos estímulos implicados en el experimento se centran en torno a los 450 nm y 600 nm, respectivamente (Fig. 3).

Se seleccionaron cinco niveles de referencia para los estímulos azules y cuatro para los estímulos rojos. Las radiancias espectrales de todos los estímulos fueron medidas mediante un espectrorradiómetro SpectraScan PR-715. A partir de estas mediciones, se calcularon la luminancia, las coordenadas cromáticas y la luminosidad de todos los

estímulos visuales. Para el cálculo de la luminosidad se utilizó el modelo de apariencia de color CAM15u, desarrollado para predecir la luminosidad de estímulos autoiluminados no relacionados [13]. Este modelo originalmente fue creado para estímulos visuales con un FOV de  $10^\circ$ , por lo que fue necesario adaptarlo para este experimento, sustituyendo las funciones fundamentales de los conos de  $10^\circ$  por las respectivas funciones para un FOV de  $2^\circ$  [14].



(a)



(b)

Fig 5. Fotografías del tablero donde se proyectaron los estímulos. (a) Se cortaron dos círculos de una cartulina negra y luego se pegó sobre una cartulina blanca. (b) El fondo negro se proyectó sobre la cartulina negra mientras que los estímulos de color se proyectaron sobre los círculos blancos.

#### B. El proceso experimental

En el experimento, los observadores se sentaron frente al tablero donde se proyectaban los estímulos y se les permitía usar visión binocular. La tarea puede describirse de la siguiente manera: el experimentador fija uno de los estímulos a una luminancia de referencia; posteriormente, el observador puede, mediante un control de tres botones, ajustar la luminancia (utilizando dos de los botones) del otro estímulo hasta que el observador juzgue que tienen la misma luminosidad. Cuando esta condición se alcanza, se registran las radiancias espectrales de ambos estímulos; finalmente, el observador presiona el tercer botón para comenzar con la siguiente escena de igualación de luminosidades.

#### C. Los observadores

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Visión del Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión de la Universidad Nacional de Tucumán - CONICET, Argentina. Se seleccionaron dos grupos de observadores: el primero compuesto por 7 jóvenes (3 mujeres, 4 hombres) de edades comprendidas entre 22 y 29 años (promedio de 25 años); y el

segundo compuesto por 5 adultos mayores (3 mujeres, 2 hombres) de edades comprendidas entre 66 y 72 años (promedio de 70 años).

Antes del experimento, la visión de color de cada observador se evaluó mediante la prueba Farnsworth-Munsell 100. Además, los observadores tenían que responder a un cuestionario de salud visual en el que se les consultaba sobre posibles enfermedades y antecedentes que pudieran poner en duda su capacidad visual. Específicamente, se les preguntó si tenían cataratas, glaucoma, diabetes, retinopatía diabética y degeneración macular.

#### 4. Resultados

La Fig. 6 muestra dos gráficas con la media de las igualaciones (y el error estándar de la media) de luminosidad para ambos grupos de observadores cuando la referencia es el estímulo azul y cuando la referencia es el estímulo rojo.

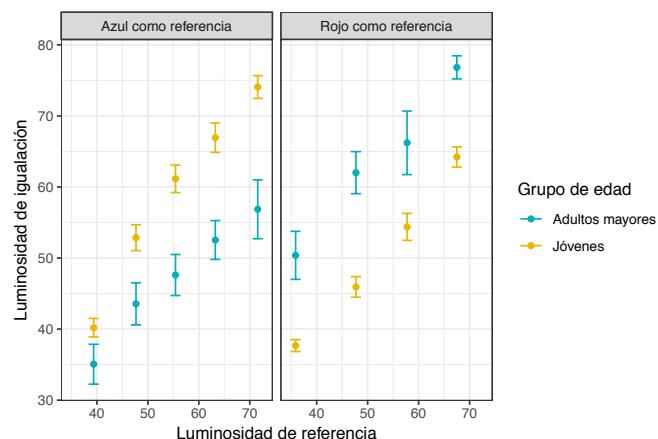


Fig. 6. Resultados de la igualación de luminosidades con respecto a la luminosidad de referencia (con error estándar de la media). Existe una diferencia significativa en la percepción de luminosidades entre los dos grupos de edad.

Se encontró que existe una diferencia significativa en la percepción de la luminosidad entre los dos grupos de edad Fig. 6. Además, los resultados concuerdan con que planteado en la hipótesis: cuando la referencia es el estímulo rojo, los observadores adultos mayores necesitaron una mayor luminosidad del azul para llevar a cabo la igualación, lo cual indicaría que perciben el azul como menos luminoso. En el caso contrario, cuando el estímulo azul es la referencia, los observadores jóvenes necesitaron una mayor luminosidad del estímulo rojo que los adultos mayores para hacer la igualación. Esto indicaría que los observadores jóvenes ven a la referencia azul con mayor luminosidad por lo que necesitan más luminosidad del estímulo rojo para realizar la igualación.

La Fig. 7 muestra los resultados en un mismo gráfico, lo que permite comparar mejor las diferencias que emergen de las igualaciones realizadas con las distintas referencias. Se

muestra que las igualaciones de luminosidad para los observadores jóvenes prácticamente caen en la línea discontinua de  $45^{\circ}$  que significa que se percibe la misma luminosidad. Esto significa que el modelo CAM15u predice adecuadamente la percepción de luminosidad de los jóvenes.

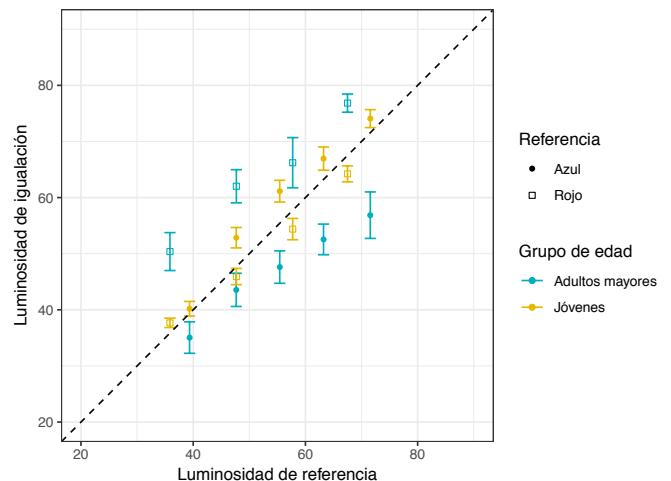


Fig. 7. Resultados de la igualación de luminosidades con respecto a la luminosidad de referencia para los dos grupos de edad. Los resultados de los observadores jóvenes se encuentran muy cerca de la línea discontinua que implica igualdad en luminosidad. Esto significa que el modelo CAM15u predice adecuadamente su percepción de luminosidad.

Los modelos de apariencia de color son modelos que predicen, al menos, los atributos perceptuales de tono, saturación y luminosidad [15].

Hablando específicamente de la luminosidad, estos modelos pretenden dar una mejor respuesta a la sensación visual que no se corresponde con las mediciones de luminancia de muchos estímulos visuales. Una discrepancia muy conocida entre la luminancia y la luminosidad es el efecto Helmholtz-Kohlrausch (H-K). Este efecto pone en evidencia que un estímulo puede parecer más luminoso que otro en función del color y de la saturación, aun cuando ambos estímulos tengan la misma luminancia [16], [17]. Por ejemplo, estímulos muy coloridos parecen más luminosos que los grises; de la misma manera, estímulos azules y rojos saturados, son percibidos como más luminosos que los verdes y amarillos con la misma luminancia.

Específicamente, cuando se comparan luces azules y rojas, algunas investigaciones han demostrado que una luz azul saturada se percibirá más luminosa que una luz roja saturada con la misma luminancia [17]. En la Fig. 8, se graficaron nuevamente los resultados del experimento de igualación de luminosidades pero en términos de luminancia. En primer lugar, puede notarse que el efecto H-K es evidente en los resultados de los observadores jóvenes: la luminancia del estímulo rojo es siempre más alta que la luminancia del estímulo azul para la misma luminosidad percibida.

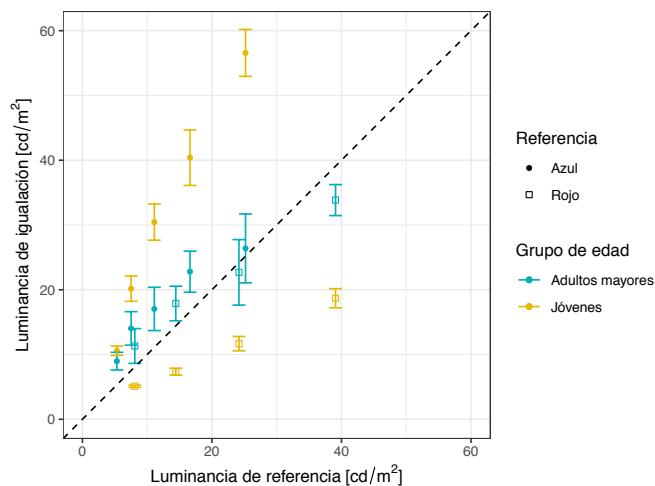


Fig 8. Resultados del experimento de igualación de luminosidades en términos de luminancia. Los resultados de los observadores adultos mayores son muy cercanos a la línea discontinua que implica una igualdad en luminancia.

Sin embargo, lo más interesante a observar en esta gráfica es que los resultados de los observadores adultos mayores, caen muy cerca de la línea discontinua de 45°, lo que significa la misma luminancia para la igualación de luminosidades. Esto quiere decir, que, para estos observadores, la luminancia fue una buena aproximación de su percepción de luminosidad. La razón de esta situación podría explicarse por la pérdida de transmitancia en el ojo en las longitudes de onda cortas. Esto de alguna manera contrarrestaría el efecto H-K para los adultos mayores.

## 5. Conclusiones

Varios estudios han demostrado que la percepción del color se mantiene muy estable a pesar de los cambios en la transmitancia del cristalino, las pérdidas de sensibilidad en los mecanismos receptores de los conos y el aumento de la densidad del pigmento macular con el envejecimiento [10], [11], [18], [19]. Por lo tanto, se cree que algunos mecanismos compensan la pérdida de luz de onda corta en la percepción del color [9], [11], [20].

Sin embargo, la percepción de la luminosidad y su posible constancia con la edad, no ha sido investigada extensamente [21]. El propósito de este trabajo fue investigar si las diferencias en la transmitancia de luz para longitudes de onda corta causadas por el envejecimiento del ojo, son compensadas para mantener la percepción de la luminosidad constante con la edad.

Los resultados de un experimento en el que se comparan estímulos azules y rojos en términos de luminosidad percibida, han mostrado una diferencia significativa entre dos grupos de observadores de distinta edad. Los observadores adultos mayores percibieron a los estímulos azules como menos luminosos que los observadores jóvenes. Estos resultados

sugieren que la diferencia en la percepción de luminosidad puede atribuirse a los cambios en la transmitancia del ojo con el envejecimiento.

Los resultados también han mostrado que el modelo de apariencia de color CAM15u predice adecuadamente la percepción de luminosidad de los observadores jóvenes. Además de esto, es interesante mencionar que, en el experimento, los estímulos presentados a los observadores no fueron autoiluminados, sino proyectados sobre pantalla, lo que podría indicar que el modelo CAM15u puede funcionar correctamente no sólo para estímulos autoiluminados sino también para estímulos reflejados.

Cuando se analizan los resultados en términos de luminancia, es muy interesante notar que, para los adultos mayores, la luminancia parece ser un buen indicador de la luminosidad percibida.

Dado que, de acuerdo con otras investigaciones, la percepción del color permanece prácticamente inalterada con la edad, el efecto H-K también debería permanecer constante con la edad. Sin embargo, pareciese que, debido a la filtración de la luz en las partes bajas del espectro visible, el efecto H-K sería compensado, es decir, que el resultado final de la combinación de estos dos efectos es la aparente cancelación del efecto H-K para los adultos mayores.

## 6. Reconocimientos

Este trabajo se llevó a cabo gracias al apoyo de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina (PIUNT E627); del CONICET de Argentina (Beca Postdoctoral); del Grupo Coimbra de Universidades Europeas y de la Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven) Technologiecampus Gent, Bélgica (Beca Estancia Postdoctoral).

## 7. Referencias

- [1] P. Boyce, "Lighting for the Elderly," in *Technology and Disability*, vol. 15, CRC Press, 2003, pp. 165–180.
- [2] W. N. Charman, "Age, lens transmittance, and the possible effects of light on melatonin suppression," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 23, no. 2, pp. 181–187, 2003.
- [3] E. A. Boettner and J. R. Wolter, "Transmission of the Ocular Media," *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, vol. 1, no. 6, pp. 776–783, 1962.
- [4] F. M. Barker and G. C. Brainard, "The direct spectral transmittance of the excised human lens as function of age (FDA 785345 0090 RA)," Washington, DC, 1991.
- [5] CIE, *CIE Publication 203:2012, A computerized approach to transmission and absorption characteristics of the human eye*. Vienna, Austria: CIE Central Bureau, 2012.
- [6] P. Lennie, J. Pokorny, and V. C. Smith, "Luminance," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 10, no. 6, p. 1283, 1993.
- [7] CIE, *CIE S 017/E:2011 International Lighting Vocabulary*. Austria, 2011.
- [8] B. Blakeslee and M. E. McCourt, "A common theoretical

- framework for brightness and lightness perception,” *Perception*, vol. 44, no. 4, pp. 359–362, 2015.
- [9] N. T. Stringham, D. Sabatinelli, and J. M. Stringham, “A potential mechanism for compensation in the blue—yellow visual channel,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, no. July, pp. 1–6, 2013.
- [10] C. Owsley, “Aging and Vision,” *Vision Research*, vol. 51, no. 13, pp. 1610–1622, 2011.
- [11] S. Wuerger, “Colour Constancy Across the Life Span: Evidence for Compensatory Mechanisms,” *PLoS ONE*, vol. 8, no. 5, 2013.
- [12] D. Brainard, “The Psychophysics Toolbox,” *Spatial Vision*, vol. 10, no. 4, pp. 433–436, 1997.
- [13] M. Withouck, K. A. G. Smet, W. R. Ryckaert, and P. Hanselaer, “Experimental driven modelling of the color appearance of unrelated self-luminous stimuli: CAM15u,” *Optics Express*, vol. 23, no. 9, p. 12045, 2015.
- [14] CIE, *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part I*. 2006, p. 54.
- [15] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Third Edit. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [16] D. Corney, J. D. Haynes, G. Rees, and R. B. Lotto, “The brightness of colour,” *PLoS ONE*, vol. 4, no. 3, 2009.
- [17] R. L. Donofrio, “Review Paper: The Helmholtz-Kohlrausch effect,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 19, no. 10, p. 658, 2011.
- [18] J. L. Hardy, C. M. Frederick, P. Kay, and J. S. Werner, “Color Naming, Lens Aging, and Grue,” *Psychological science*, vol. 16, no. 4, pp. 321–327, 2005.
- [19] K. E. M. Tregillus, J. S. Werner, and M. A. Webster, “Adjusting to a sudden ‘aging’ of the lens,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 33, no. 3, p. A129, 2016.
- [20] N. T. Stringham and J. M. Stringham, “Temporal Visual Mechanisms May Mediate Compensation for Macular Pigment,” *Perception*, vol. 44, no. 12, pp. 1400–1415, 2015.
- [21] M. P. Royer and K. W. Houser, “Spatial brightness perception of trichromatic stimuli,” *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 9, no. 2, pp. 89–108, 2012.

## 8. Biografías

**Oscar U Preciado** actualmente realiza estudios postdoctorales en el Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV-UNT-CONICET) y es docente en las carreras de grado y posgrado del Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión de la Universidad Nacional de Tucumán en Argentina. Su experiencia e intereses en investigación se encuentran principalmente en las áreas de visión, color, alumbrado vial y de exteriores, iluminación natural y eficiencia energética.

**Andrés Martín** es Dr. En Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente por la UNT, investigador Adjunto del CONICET y docente de la Universidad Tecnológica Nacional en Argentina. Su interés está centrado en la percepción visual y en las técnicas psicofísicas adecuadas para su cuantificación.

**Eduardo Manzano** es Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña, docente e investigador de la Universidad Nacional de Tucumán y actualmente, Director de Ciencia y Técnica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la misma universidad. Cuenta con amplia experiencia en docencia e investigación en las áreas de diseño de iluminación de exteriores y alumbrado público.

**Peter Hanselaer** es profesor e investigador de la Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven) Technologiecampus Gent, Bélgica. Es fundador y director del grupo de investigación del Light&Lighting Laboratory. Sus principales áreas de investigación son: iluminación de interiores, percepción y apariencia, diseño óptico y metrología óptica. En todos estos temas, su investigación se combina con actividades de consultoría industrial. El grupo que dirige contribuye activamente al desarrollo de criterios para instalaciones de iluminación eficientes, nuevos enfoques de representación del color y cálculos de deslumbramiento. Peter es el editor de la División 1 de la CIE.

# Paisagem na antártica: os efeitos da luz na leitura e entendimento da dinâmica do ambiente

Marins, D.P.A<sup>1,a</sup>, Segatto, M.V.<sup>1</sup>, Alvarez, C.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>a</sup> mailto:daniela.pawelski@gmail.com

**Resumo.** Na atual cultura humana, a apreensão do espaço é feita mais pelo contato visual que por outros meios de percepção. A luz torna-se responsável pela criação de uma atmosfera e influencia na qualidade da experiência e da apropriação desta paisagem. Através dos efeitos da luz, que se comportam dependendo do objeto iluminado, do observador e seu posicionamento, são experimentadas diferentes situações. O objetivo deste estudo é identificar como o sentido da visão influencia na percepção da paisagem através da categorização dos efeitos da luz natural usando a fotografia e a paisagem Antártica como veículo de identificação desses fenômenos. Para o desenvolvimento deste estudo buscou-se uma metodologia de identificação e desdobramento do comportamento da luz e seus efeitos, que define características de efeitos e consequências advindas da luz, utilizados para leitura de espaços internos e externos com luz natural e artificial. Neste trabalho avalia-se o uso deste método na luz natural e os efeitos inerentes desta fonte luminosa, na análise da paisagem, determinando uma forma de ler o espaço e identificar suas peculiaridades e composições. Consequentemente, a análise da paisagem, que, a princípio, é subjetiva, pode ser medida através da visão. Os efeitos da luz podem ser, então, classificados como indicadores metodológicos e serem aprofundados, criando uma escala de percepção na qualidade do espaço.

**Key Words:** Efeitos da Luz, Iluminância, Percepção, Análise da Paisagem, Antártica.

## 1. Introdução

A visão é o principal sentido na apreensão do espaço em que se vive. A cultura humana valoriza mais o contato visual em comparação com os outros meios de percepção [1],[2]. Nesta linha de pesquisa, o olho é identificado como o veículo comunicador de toda informação das imagens e, desta forma, ele funciona fisiologicamente apenas com estímulos lumínicos, ou seja, se não há luz não há imagem [3].

Para observar a luz deve-se abster que sua origem é o ponto de informação. As características eletromagnéticas do raio visível geram muitos efeitos e consequências relacionadas à sua incidência como, por exemplo, a melhor compreensão do objeto que ilumina.

Dentre os fenômenos eletromagnéticos causados pelo raio visível, também chamados de efeitos da luz, pode-se afirmar que a luz define e delinea o mundo visual através de suas incidências e reflexões nas superfícies. Quando um objeto é atingido pelo raio luminoso, este produz efeitos diferenciados e influenciados pelas suas próprias características e propriedades. Um exemplo está relacionado à textura da superfície iluminada, que pode gerar efeitos de modificação da cor, enquanto o ângulo de incidência influencia no brilho, assim como o ponto de observação também modifica o que se vê. A sombra é o efeito mais marcante da luz e, na leitura do

espaço, se comporta de forma caligráfica, contornando as formas e demarcando as superfícies. Cria-se, assim, a noção de volume.

Na paisagem, a luz pode ser filtrada por uma tempestade ou neblina e pode sofrer reflexões em superfícies molhadas e, desta forma, criar brilhos ou superfícies espelhadas. Quando a luz passa pelo ar com chuva, pode se difratar em sete cores, formando o denominado arco-íris. Assim, além de criar efeitos surpreendentes, a luz também pode criar efeitos negativos como, por exemplo, ofuscar quando vista diretamente ou quando refletida numa superfície brilhante.

Portanto, os efeitos da luz se comportam de forma positiva e negativa, dependendo do objeto iluminado e do observador e seu posicionamento. Pode-se afirmar que a luz é responsável pela criação da atmosfera do espaço e da paisagem e influencia na qualidade da apreensão da experiência e na apropriação desta.

O objetivo deste estudo é identificar como o sentido da visão influencia na percepção da paisagem através da categorização dos efeitos da luz natural usando a fotografia e a paisagem Antártica como veículo de identificação desses fenômenos.

## 2. A influência dos efeitos da luz sobre a percepção do espaço

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se uma metodologia de identificação e desdobramento do comportamento da luz e seus efeitos, encontrado na pesquisa de Lou Michel [4], em que o autor define características de efeitos e consequências advindas da luz, utilizadas para leitura de espaços internos e externos com luz natural e artificial. Esta metodologia será utilizada na avaliação dos efeitos da luz natural e na análise da paisagem, apresentando uma forma e sequência de leitura do espaço e identificando suas peculiaridades e composições, relacionadas com os efeitos óticos. Este tipo de análise foi também utilizada por outros autores em estudos individuais de iluminação, os quais avaliam a percepção de espaços internos e externos, além de fenômenos compostos com outras fontes de luz [5][6][7].

Logo, os efeitos de luz serão conceituados e, como resultado serão identificadas as relações da paisagem com a iluminação natural, apontando a influência dos efeitos da luz, tanto na percepção do espaço como no conforto visual.

É importante ressaltar que as reproduções fotográficas descrevem o mesmo cenário, sendo esta forma de análise amplamente utilizada no campo da avaliação da percepção dos espaços [8], principalmente tratando de aspectos qualitativos [9]. Para este ensaio de avaliação da percepção da paisagem

são utilizadas imagens fotográficas da Antártica em diferentes situações de composição e luz, exemplificando o que cada efeito lumínico pode valorizar na leitura e apreensão do espaço. Destaca-se que a escolha do ambiente antártico como estudo de caso deve-se, especialmente, por suas características atípicas que permitem uma melhor compreensão do fenômeno estudado.

Para entender o comportamento e características da luz é preciso criar uma proficiência em desenhar e ler os seus efeitos. Nesta leitura da paisagem Antártica foi identificado em cada imagem os efeitos de luz individualizados, com o intuito de isolá-los do panorama geral, para uma compreensão da dinâmica de uma única fonte de luz e sua incidência na paisagem, a qual, em um primeiro momento, se apresenta monótona e com poucas cores e após a individualização e percepção dos muitos efeitos da luz pode-se compreender a complexidade e multiplicidade desta avaliação subjetiva.

A proposta de análise da paisagem deste estudo percorre sete passos de identificação: iluminância e luminância, fator de luminância e luminosidade, refletância e reflexões, luz e sombra, textura como definição de superfície, ofuscamento, luminosidade e o ângulo de observação, e, por fim, como a luz refletida transforma o espaço.

#### A. Iluminância e Luminância

A luz visível é apenas uma parte de todo o espectro de energia de uma fonte, e apesar de ser comprovado por físicos que a luz é emitida em ondas, com diferentes frequências, em termos práticos para o projeto, considera-se que a luz é uma linha reta. Este raio de luz pode ser refletido, absorvido ou refratado pela superfície incidente. Logo, a luz que chega na superfície é a iluminância e a quantidade de luz que é refletida desta superfície é a luminância [5].

Iluminância obedece à lei do quadrado inverso, isto é, a quantidade de luz que chega em uma superfície depende diretamente da distância da fonte até o objeto iluminado, logo, pode-se afirmar que a quantidade de luz varia inversamente ao quadrado da distância da fonte e do objeto iluminado [4].

A luz refletida de uma superfície é a luminância, e este é o aspecto mais importante da iluminação. Tecnicamente a luminância é a luz que sai de uma superfície após a reflexão, desta forma, luminância depende diretamente da propriedade de reflexão do material da superfície iluminada e da quantidade de iluminância que a superfície recebeu.

Na paisagem é importante ressaltar que a luminância de um elemento não muda para o observador, independente da distância que este se encontra do objeto, ou da cena. Portanto, não importa se o observador se encontra próximo ou distante do objeto iluminado. A aparência de um objeto ou cena é o ponto chave para fazer composições de claro e escuro entre formas no campo visual.



Fig 1. Paisagem na Antártica, exemplificando a incidência de luz nas diferentes superfícies. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

Na Fig. 1 pode-se verificar muitos tipos de superfície iluminados pelo mesmo foco luminoso. O céu está claro e contrasta com a superfície coberta por neve em tom mais acinzentado – considera-se que a luz que chega até o observador é diferente na parte com neve central (aparentemente mais intensa e até ofuscante) e na área ao lado (pouca reflexão e menos detalhes). É perceptível que a luz se comporta diferente no mesmo material e dependendo do ângulo de incidência incorpora outras tonalidades no mesmo.

A impressão que fica na observação da paisagem nesta imagem é que a quantidade de luz que reflete no centro da paisagem é maior que na paisagem como um todo, criando um ponto focal na imagem que ofusca todo o restante da paisagem.

#### B. Fator de Luminância e Luminosidade

Conforme a luminância aumenta ou diminui, a luminosidade de um objeto muda em relação ao seu entorno. Deste conceito observa-se que a luminosidade é definida pela aparência que um objeto tem em comparação com outro objeto. A Fig. 2 mostra como um mesmo tom de cinza, localizado centralmente pode parecer mais claro ou mais escuro dependendo do fundo em que se insere.

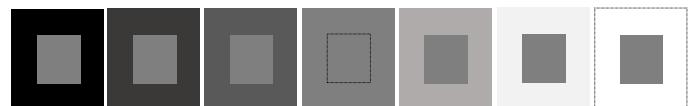


Fig 2. Escala de contraste entre tons de cinza variável no fundo e fixo no centro [4].

Por exemplo, em uma imagem contendo um objeto com a Luminância de  $16 \text{ cd}/\text{ft}^2$  e o fundo com Luminância de  $8 \text{ cd}/\text{ft}^2$ , o fator de Luminância é de  $2/1$ . Contudo, em uma paisagem, quando se comparam duas superfícies com diferentes luminâncias não se obtém necessariamente a mesma diferença

perceptiva em luminosidade, desta forma, é possível criar uma escala com essas proporções e classificá-las com níveis que dependem de cada fator de luminância, os quais ajudam a identificar as relações de luminosidade entre os objetos na paisagem (Quadro 1 e Fig. 3).

Quadro 1: Fator de Luminância [4]

Fator de Luminância	Descrição da Percepção
2/1	Diferença de luminosidade facilmente percebida entre duas superfícies.
3/1	Destaque para uma área focal entre o objeto e o pano de fundo. Fator de luminosidade máximo para o conforto visivo de leitura.
10/1	Este fator de proporção cria um ponto focal de alto contraste e com características dominantes atraendo a atenção do observador.
25/1	Céu claro visto de uma janela em ambiente escuro. Criando um efeito extremamente contrastante e desconfortável.



Fig 3. Paisagem na Antártica, exemplificando como o contraste muda a percepção do espaço. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

A paisagem da Fig. 3 apresenta vários planos de composição e diferentes escalas de luminosidade e de contraste, contudo, com poucos objetos e elementos.

Logo no último plano a nuvem apresenta um fator de luminância bem alto, possivelmente na escala de 10/1 em contraste com a rocha escura. Por outro lado, no primeiro plano, a água se apresenta com muita luminosidade e baixo contraste, com fator de luminância em torno de 2/1, sugerindo um fator baixo entre esses dois materiais – o gelo e a rocha – sendo que essa sensação desfoca a visão e tende a dar uma impressão de achatamento da imagem. No contorno da fotografia existe também uma relação bem inesperada de dia claro com nuvens bem carregadas, criando novamente um

ponto focal no centro da imagem, e direcionando o olhar do observador para o contorno da geografia.

Quantificar a relação dos elementos da paisagem pode ser uma forma de qualificá-la em relação ao conforto visivo, e, esta proporção diferenciada de contrastes pode incomodar ou proporcionar outras sensações ao observador. Além disso, contemplar a paisagem natural possibilita, entre outros aspectos, o adequado funcionamento do ciclo circadiano.

### C. Refletância e Reflexões

A luz segue seu percurso em raio indefinidamente, até ser atingida por um objeto. Esta incidência repercute de três formas na superfície, ou seja, podendo ser absorvida, refletida ou transmitida.

Nem toda luz que incide sobre uma superfície é completamente refletida. Superfícies altamente brilhante e espelhadas absorvem uma parte da luz incidente, sendo que refletir 100% é um efeito muito raro no mundo visual. Uma superfície branca reflete em torno de 85% da luz que recebe e uma superfície escura ou preta, reflete 4% da luz recebida [10]. Esses valores dão uma escala sobre a percepção das cores e do ambiente e sua relação com a reflexão da luz nas superfícies.

Apesar desta aparente influência na leitura e percepção dos objetos, a refletância não é modificada em nada se a iluminância sobre a superfície aumentar, assim, o fator de luminância continuará o mesmo independentemente da quantidade de luz que atinge o objeto. Portanto, a percepção depende do tipo da superfície incidente e a luz reflete de maneira diversa em 3 possíveis formas: especular, respeitando o mesmo ângulo de incidência, ocorrendo geralmente em superfícies polidas; distribuída em uma direção, influenciado pelo ângulo de incidência e em superfícies rugosas; e no modo difuso, que se espalha em todas as direções, sendo a forma mais comum de reflexão e, geralmente, este é um comportamento de superfícies opacas.

A paisagem antártica, num primeiro olhar, é uma imagem de fácil e rápida leitura, apresentando poucos elementos e poucas cores. A análise das superfícies dos elementos existentes permite, ao observador, ir além da apreensão superficial dos objetos e entender um pouco sobre o comportamento deles.

Na Fig. 4, percebe-se que a refletância é um fenômeno que predomina a leitura da paisagem. A água ocupa uma faixa considerável desta paisagem em forma líquida, em forma sólida, na neve e em vapor, nas nuvens. Em cada forma física ela exerce um efeito diferente em relação à incidência da luz natural, sendo que na água, líquida, se comporta como um espelho, refletindo o esboço de toda a outra parte da paisagem, delineando a montanha e o céu. Delimita, com diferentes níveis de luminância, as áreas de maior reflexão da luz e luminosidade da neve e absorve parte da luz refletida do céu compondo sombras e nuances na água. O reflexo do sol, determina o ponto focal da paisagem e engrandece o efeito de brilho na imagem.



Fig 4. Paisagem na Antártica, exemplificando as diferentes formas de refletância dos elementos. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

Ainda, na mesma imagem, nota-se que a luz apesar de se posicionar diretamente no ângulo de observação, não ofusca, e pouco interfere na distribuição luminosa homogênea do espaço.

#### D. Luz e Sombra

Quando um objeto é atingido por um raio de luz, ele não apenas é iluminado e reflete parte desta luz, como também cria outro fenômeno que é a base da percepção espacial e representação artística: a sombra. As sombras são responsáveis pela modelagem tridimensional dos objetos [11].

A sombra se comporta de duas formas: agregada ao objeto, e sombra de trajeto. A primeira, são as superfícies não iluminadas diretamente contidas no próprio objeto ou forma, e a segunda, são as sombras geradas a partir da imagem projetada do objeto pela fonte luminosa, sobreposta em outro objeto ou outra parte deste mesmo objeto, também denominadas projeções.

As sombras evidenciam o posicionamento da fonte luminosa e é um veículo de comunicação do movimento do Sol. É um recurso de identificação da real forma dos objetos e de fácil apropriação do olho humano. As sombras respeitam as leis da perspectiva e criam pontos de fuga e volumetria. Se a luz for reduzida, as sombras também diminuem, assim como os detalhes dos objetos inerentes à forma.

Nenhum outro efeito da luz é mais artístico do que a composição entre a luz e a sombra. Qualquer objeto que se posiciona no caminho do raio luminoso cria sombras nele mesmo e à sua volta, logo, deve-se ter extrema atenção a esse fenômeno, uma vez que ele define a qualidade espacial dele mesmo e dos arredores, interferindo na percepção do meio em que se encontra.

A posição da fonte luminosa na Fig. 5 determina o posicionamento da sombra agregada e a direção da sombra

projetada. Desta forma, organizam-se espacialmente os tons da paisagem e as nuances de claro e escuro, presentes na paisagem de diversas formas, por exemplo, na água, compondo a parte inferior da imagem, a luz a e a sombra determinam o tipo de material e textura. Nem sempre a sombra é completamente escura, dependendo também do contraste e da luminosidade espacial, que por sua vez, depende de outros fenômenos como, por exemplo, a luminância, a iluminância e a reflexão dos materiais.



Fig 5. Paisagem na Antártica, exemplificando o comportamento das sombras. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

Ainda na mesma imagem nota-se que os contornos da paisagem estão bem delineados e a volumetria se destaca pela área de sombra no cume da paisagem, sendo que as sombras agregadas demonstram a geometria suave da topografia. Ao fundo, percebe-se o terreno ausente de grandes ângulos ou vértices pela concomitante ausência da sombra projetada. A cena culmina com os tons de azul do céu e direciona o olhar do observador para o lado esquerdo da imagem com a nuvens formando linhas e levando a parte mais clara do céu.

#### E. Textura como definição de superfície

A textura influencia a apreensão da paisagem em duas escalas: a microescala, que envolve a própria definição de cada superfície, determinando se é rugoso, liso e evidenciando o tipo de material que os objetos têm; e a macro escala, que se apresenta na repetição de objetos no espaço, os quais podem criar texturas através da regularidade de objetos iguais, ou composição de outros objetos.

A luminosidade e as diferenças graduais de claro e escuro fornecem muita informação sobre as superfícies e suas características, logo, é possível reconhecer uma superfície lisa de uma rugosa através das diversas proporções de luminosidade entre elas. Da mesma forma, pode-se definir a profundidade do objeto pela visualização da textura deste, sendo que geralmente objetos mais próximos permitem definir

o tipo de superfície, e, esta acuidade vai diminuindo a partir do afastamento deste. A proporção da textura também modifica a leitura do espaço e traz consigo informações sobre profundidade, densidade e tamanho.

A luminosidade é um dos efeitos da luz mais relacionado com a textura, e, quando a luz incide em uma superfície evidencia contrastes entre luz e sombra. A relação de tamanho e densidade dos elementos podem ser determinados pelo tipo e textura da superfície. Essa proporção modifica a aparência do objeto, logo, uma superfície mais rugosa aparenta ser mais escura, uma vez que se criam mais sombras, e uma superfície mais lisa comporta-se inversamente.

Na Fig. 6 a água se apresenta com luminosidade homogênea, quase como um espelho, permitindo identificar que não há ação do vento. Já na faixa central da fotografia, percebe-se uma variação da luminosidade com uma mistura de claro e escuro determinando dois tipos de materiais bem definidos no contexto da geografia. Por outro lado, o entardecer e a luz avermelhada do sol se pondo conota ao céu uma textura suave das nuvens, misturadas com uma ampla paleta de cores, advindas das reflexões da luz nos diferentes tipos de nuvens.



Fig 6. Paisagem na Antártica, exemplificando as texturas. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

#### F. Ofuscamento

Os efeitos da luz nem sempre são confortáveis aos olhos humanos. Uma quantidade excessiva de luz pode não ser tolerante pelo olho humano e se for direcionada diretamente ao olho, causa o denominando ofuscamento. Existem alguns níveis de ofuscamento e estes vão desde um desconforto visivo, que pode se transformar em incapacidade e até mesmo cegueira [6],[12],[13].

A experiência do ofuscamento é comum entre os seres humanos e, de diferentes formas, a maioria das pessoas que possuem capacidade visual já experimentaram, como por exemplo, em um final de tarde onde o baixo ângulo do Sol no horizonte ocasiona desconforto visual ou a sensação de cegueira, passando de um espaço escuro para o claro abruptamente.

A sensação de ofuscamento é produzida dentro do olho humano, através do movimento de abertura e fechamento da íris. A íris é um músculo do olho, logo, o ofuscamento é um problema maior para o usuário mais idoso, uma vez que esses músculos já se encontram fadigados pelos anos e não respondem com a velocidade necessária ao estímulo [3].

A cegueira por ofuscamento ocorre quando uma quantidade de luz excessiva entra no olho em um ângulo próximo ao da linha de visão, dissimulando o funcionamento da retina em condições extremas, causando grande ou total perda da visibilidade, desta forma, os objetos não podem ser vistos.

Em proporções menores, quando o ofuscamento incomoda o observador, mas ainda assim permite a visão dos objetos, chama-se de incapacidade visual, sendo que esse fenômeno é bem frequente e geralmente percebido no trânsito e é causa de muitos acidentes visto que o motorista é ofuscado pela luminosidade do Sol e tem sua acuidade visual reduzida, logo, interferindo em sua performance na condução do veículo. Esta condição visiva reduz a percepção de detalhes em superfícies e interfere ou impossibilita a leitura do entorno.

O desconforto visual é um fenômeno não menos importante devido à sua frequente ocorrência. Estudos recentes comprovam a influência deste fenômeno não apenas em termos quantitativos de luz e relações óticas, mas também com aspectos qualitativos e subjetivos [14],[12]. Este tipo de ofuscamento influencia no dia a dia das pessoas e conecta o sentido da visão com a qualidade de vida.

Controlar o ofuscamento é essencial para a ergonomia, para a leitura do espaço e para a percepção da paisagem. Quando uma fonte de luz se desloca do ângulo de visão, o efeito se comporta de forma diferente e, dependendo do ponto do observador, o ofuscamento pode ser nulo, menor ou maior.

No caso da paisagem, esses efeitos e fenômenos fazem parte do ciclo do dia, das estações do ano e, através da observação dessas mudanças, permitem o apreendimento do movimento do Sol e da Terra, e das mudanças do cenário natural, conectando o observador ao seu ciclo circadiano [15], [16].

Em síntese, quando uma fonte de luz direta ou o brilho excessivo de um material reflexivo atinge o olho humano ocorre o fenômeno do ofuscamento. Uma imagem estática auxilia no entendimento deste fenômeno pois em muitas situações se trata de milésimos de segundos desta interferência da luz na córnea do olho.

Na Fig. 7 observa-se que o brilho altamente contrastante do Sol na água é o reflexo direto da luz solar e causa um desconforto ao observador, pois não permite a leitura completa do movimento da água, nem do contorno das montanhas. É difícil, nesta imagem, entender se é dia, ou noite, e relacionar o visual com tempo e movimento.



Fig 7. Paisagem na Antártica, exemplificando as dificuldades de percepção causadas pelo ofuscamento. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

A mesma imagem ainda apresenta uma sensação ao fundo da paisagem de incapacidade de descrever o que é exatamente panorama do segundo plano, se são nuvens ou montanhas. Desta forma, o pouco contraste somado à luminosidade específica no centro da fotografia, geram o ofuscamento com desconforto visivo, o qual impede a apreensão e compreensão da paisagem.

Esta cena captada pelo olho humano e aliada à interpretação cerebral, cria uma leitura da paisagem que vai muito além dos fenômenos físicos da luz, onde os olhos não conseguem identificar o objeto e abre espaço para as interpretações cerebrais, criando incógnitas espaciais e sujeito às experiências individuais de cada observador, que podem estar relacionadas às experiências positivas ou negativas, como medo, distância, tempestade, perigo, desconhecido, etc.

#### G. Luminosidade e o ângulo de observação

O posicionamento do observador altera a percepção da paisagem. A textura e as sombras em uma superfície determinam a aparência do nível de luminosidade desta, porém de um específico ponto de vista. Se o ponto do observador for alterado e mudar de posição ou de inclinação, a luminosidade também vai mudar. Isso acontece porque uma superfície é percebida através das diferentes texturas e sombras, ou seja, quanto menos sombras e menos texturas forem percebidas, pode-se compreender distância entre o ponto do observador e objeto.

Quando o objeto e o ponto de observação mudam de distância e de ângulo, a luminosidade também muda. Pode-se observar no exemplo da Fig. 8, que próximo ao observador existe uma maior acuidade nas texturas através das sombras bem definidas, apesar da pouca luminosidade da imagem.

À medida que o ponto observado se afasta, no segundo plano, a paisagem apresenta-se mais homogênea em termos de luminosidade e textura, mesmo com uma composição mais complexa e escura do que ocorre no primeiro plano.



Fig 8. Paisagem na Antártica, exemplificando as diferenças visuais causadas pelo posicionamento do observador. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

Pode-se fazer um paradoxo com esse parâmetro, luminosidade e o ângulo de observação e o ofuscamento, ambos têm relação direta com a interação do observador, fonte luminosa e objeto observado. Estes, se encontram alinhados causando desconforto pelo excesso de luz ou pela ausência de luz.

Assim, mesmo com a iluminação bem distribuída, o panorama desta imagem contém objetos de difícil compreensão visual. As sombras na água podem ser rochas ou contas ou gelo, a textura é paisagem estática ou em movimento? O perfil geográfico das montanhas ao fundo anuncia o amanhecer ou o entardecer?

#### H. Transformando o espaço pela luz refletida

As superfícies e suas reflexões são fundamentais na percepção do espaço. A composição de materiais e a posição da fonte de luz, no caso, o Sol, e seu posicionamento na abóbada celeste, podem significativamente modificar o espaço, a luz e suas condições de incidência. O tipo de superfície do objeto iluminado, desde cor, textura e forma, muda a aparência do espaço e a percepção deste. Pode-se ter a sensação de amplitude do espaço, de luz excessiva, de formas diferentes, devido à profundidade e distância. Desta maneira, a transformação do espaço real pode-se dar através de reflexões que criam ilusões óticas e de aspecto temporário.

Na paisagem as reflexões mais frequentes e facilmente percebidas são as de efeito de espelhamento, que geralmente aumentam o espaço e ampliam a sensação de limites, podendo também ocorrerem reflexões cujo raio seja tingido pela cor do objeto que incidiu, espalhando essa nova tonalidade em outros objetos, termo conhecido como sangramento de cor (*color bleeding*).

Na Fig. 9, observa-se que a baixa luminosidade, inerente à provável baixa iluminância ou devido à pouca transmissão da

luz pelas nuvens carregadas e ao posicionamento baixo do Sol, não impedem que o espaço e a paisagem se destaque com as diferentes luminâncias dos diversos materiais e superfícies. É evidente que a luz do entardecer proporcionou uma coloração avermelhada ao céu e consequentemente à superfície do mar.



Fig 9. Paisagem na Antártica, demonstrando a luz e seu comportamento nas diferentes formas de incidência nos elementos. Fonte: imagem gentilmente cedida pelo Grupo Base EACF 2019-20.

As texturas e refletâncias individuais compõem o espaço e criam profundidade e textura. A luz guia o olhar na linha mais clara do gelo e permite uma leitura gradual da paisagem até a completa apreensão desta, criando percursos, cores e sensações. Cada momento da luz é único e nunca será apreendido da mesma forma.

### 3. Conclusões

Por muitos séculos, paisagistas exploraram o uso da luz e seus aspectos estéticos, fisiológicos e psicológicos para ler e entender os espaços. A transformação da paisagem que ocorre nos diferentes momentos do dia, com as diferentes incidências dos raios oriundos do Sol, e seus respectivos efeitos de luz criam ilusões óticas, que conforme demonstrado no estudo de caso apresentado, podem causar efeitos positivos, negativos ou sensações agradáveis ou não ao observador.

O entendimento dos fenômenos causados pela luz auxilia na compreensão das mudanças da paisagem e das diferentes sensações causadas. Assim, isolar esses fenômenos individualmente é uma tarefa de grande dificuldade, sendo parcialmente possível em situações extremas, como ocorre no ambiente antártico.

A experiência da paisagem também não pode ser vista apenas sob o aspecto visual, considerando que estar em um determinado lugar aguça os demais sentidos, sendo eventualmente uma condição para a sobrevivência, como ocorre em ambientes inóspitos e diferenciados como a Antártica.

Portanto, a análise da paisagem, que a princípio é subjetiva, pode ser medida através da visão e, desta forma,

gerar previsões e planejamento. Assim, o entendimento dos fenômenos pode auxiliar tanto no conforto e bem-estar das pessoas, mas, também, em sua própria segurança.

### 4. Referências

- [1] J. D. PORTEOUS, *Environmental Aesthetics. Ideas, politics and planning*. London, New York: Routledge, 1996.
- [2] Y. F. TUAN, *Topofilia*. São Paulo: Routledge, 1996. Routledge, 1996.
- [3] R. L. GREGORY, *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*, Fifth edit. New York, NY: Oxford University Press, 1998.
- [4] L. MICHEL, *Light: the shape of space: designing with space and light*. New York, NY: Wiley, 1966.
- [5] S. Benedetto, A. Carbone, V. Drai-Zerbib, M. Pedrotti, and T. Baccino, “Effects of luminance and illuminance on visual fatigue and arousal during digital reading,” *Comput. Human Behav.*, vol. 41, pp. 112–119, 2014, doi: 10.1016/j.chb.2014.09.023.
- [6] B. Löfving, M. Billger, and J. Thaung, “Visualization of Disability Glare Due to Veiling Luminance,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 735–740, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.084.
- [7] L. M. Geerdinck, J. R. Van Gheluwe, and M. C. J. M. Vissenberg, “Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting,” *J. Environ. Psychol.*, vol. 39, pp. 5–13, 2014, doi: 10.1016/j.jenvp.2014.04.002.
- [8] R. Hurtubia, A. Guevara, and P. Donoso, “Using images to measure qualitative attributes of public spaces through SP surveys,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 11, pp. 460–474, 2015, doi: 10.1016/j.trpro.2015.12.038.
- [9] M. Downes and E. Lange, “Landscape and Urban Planning What you see is not always what you get: A qualitative , comparative analysis of ex ante visualizations with ex post photography of landscape and architectural projects,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 142, pp. 136–146, 2015, doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.06.002.
- [10] J. C. TORNQUIST, *COLORE E LUCE: Teoria e pratica*. Istituto. Italia: Colore, Istituto del, 2001.
- [11] S. Rockcastle and M. Andersen, “Measuring the dynamics of contrast & daylight variability in architecture: A proof-of-concept methodology,” *Build. Environ.*, vol. 81, pp. 320–333, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.012.
- [12] M. G. Kent, S. Altomonte, P. R. Tregenza, and R. Wilson, “Discomfort glare and time of day,” *Light. Res. Technol.*, vol. 47, p. 1477153514547291, 2014, doi: 10.1177/1477153514547291.
- [13] J. Y. Suk, M. Schiler, and K. Kensek, “Development of new daylight glare analysis methodology using absolute glare factor and relative glare factor,” *Energy Build.*, vol. 64, pp. 113–122, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.04.020.
- [14] S. Altomonte, M. G. Kent, P. R. Tregenza, and R. Wilson, “Visual task difficulty and temporal influences in glare response,” *Build. Environ.*, vol. 95, pp. 209–226, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.021.
- [15] S. Yoneyama, S. Hashimoto, and K. Honma, “Seasonal changes of human circadian rhythms in Antarctica,” *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.*, vol. 277, no. 4, pp. R1091–R1097, Dec. 2017, doi: 10.1152/ajpregu.1999.277.4.r1091.
- [16] J. Arendt, “Biological rhythms during residence in polar regions,” *Chronobiology International*, vol. 29, no. 4. pp. 379–394, May 2012, doi: 10.3109/07420528.2012.668997.

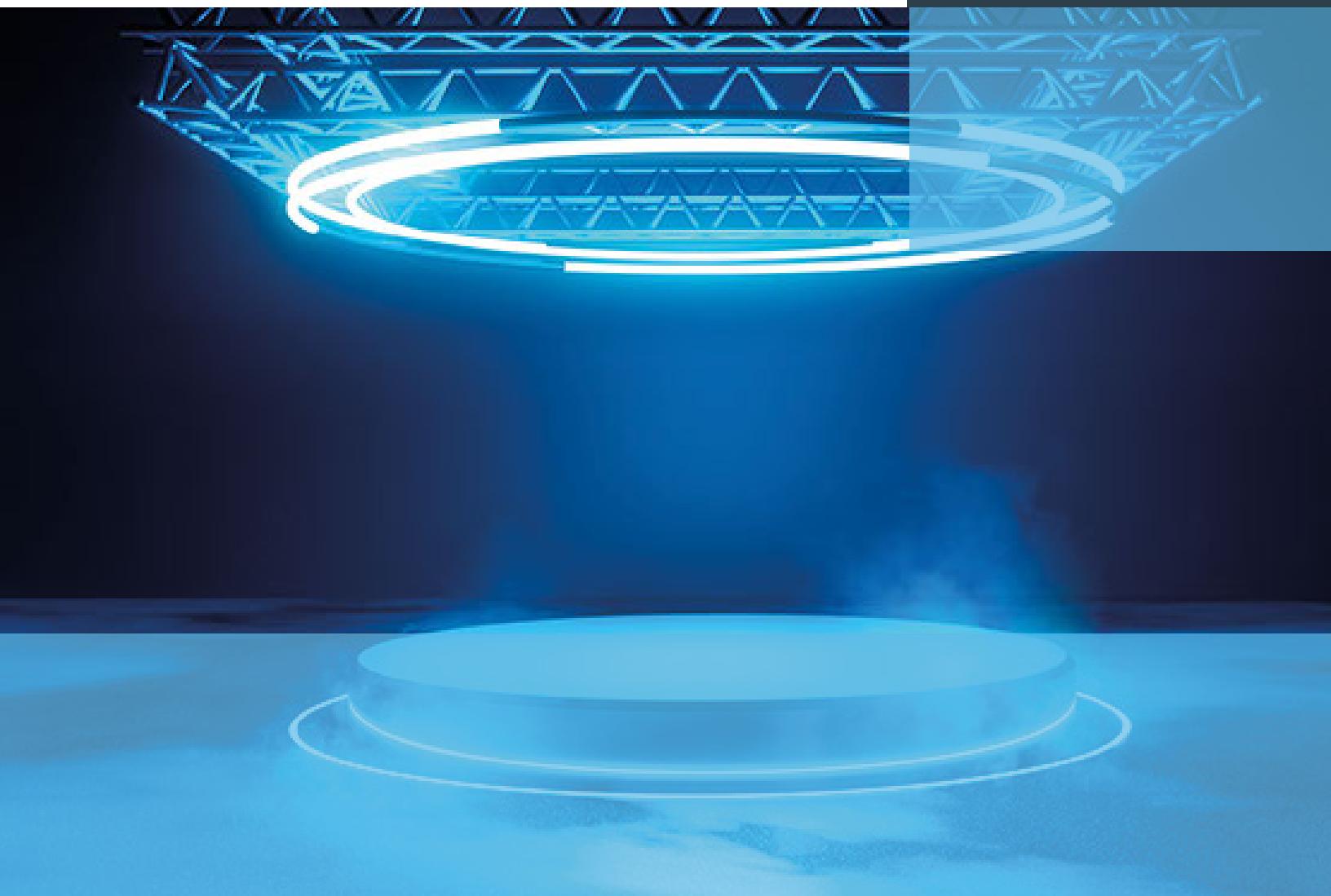
### 5. Biografias

Daniela Pawelski Amaro Marins possui graduação em arquitetura e

urbanismo e mestrado em Engenharia Civil, ambos pela Universidade Federal do Espírito Santo e mestrado em Master Architectural Lighting Design pela Universidade Hochschule Wismar. Atualmente é doutoranda do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo.

Marcelo Eduardo Vieira Segatto é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo, com mestrado em Engenharia Elétrica/Comunicações pela Universidade Estadual de Campinas e doutorado em Física pela Imperial College of Science Technology and Medicine. Atualmente é professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal do Espírito Santo.

Cristina Engel de Alvarez possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, mestrado e doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo. Atualmente, além de professora titular na Universidade Federal do Espírito Santo, é também Secretária de Estado na Secretaria de Ciências, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional do Espírito Santo.



## **Sección 2.**

## **Diseño de iluminación**

# Software para la calibración de luz extraviada en espectroradiómetros de matriz

Chávez Cañón, Miguel Ángel<sup>1,a</sup>, Quintero, Jesús M.<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nación de Colombia, Sede Bogotá

<sup>a</sup>[machavezc@correo.co](mailto:machavezc@correo.co), <sup>b</sup>[jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co)

**Resumen**—La luz extraviada es una de las fuentes de incertidumbre importantes en la medición de la luz con espectroradiómetros. Debido, principalmente al elemento dispersante en el interior de este; esta alteración puede causar errores considerablemente grandes, especialmente, cuando se mide un componente espectral de bajo nivel de una fuente de banda ancha. Por esta razón, en este trabajo se propone la implementación de la corrección de luz extraviada aplicando el método de Zong *et al*; a partir de la caracterización de la respuesta espectral en el rango visible de espectrómetros de matriz, por medio de un sistema con monocromador, en lugar de uno con un conjunto láseres. Posteriormente se desarrolla un software que automatiza el proceso de calibración a partir de las mediciones necesarias. Finalmente, se analiza el efecto de la luz extraviada y el impacto de la correspondiente corrección para diferentes tipos de fuentes de luz, por ejemplo, el cambio de la cromaticidad de la fuente medida.

**Palabras clave.** Luz extraviada, calibración, medición de la luz.

**Abstract.** Stray light is one of the important sources of uncertainty in light measurement with spectroradiometers; mainly due to the dispersing element inside it. This alteration can cause considerably large errors, especially when measuring a low-level spectral component of a broadband source. The implementation of stray light correction is presented applying the method of Zong *et al*; from the characterization of the spectral response in the visible spectrum of matrix spectrometers by means of a system with monochromator instead of with a set of lasers. Software is developed that automates the calibration process based on the necessary measurements. Finally, the effect of stray light and the impact of the corresponding correction for different types of light sources are analysed, such as the change in chromaticity of the measured source.

**Key Words.** Stray light, calibration, light measurement.

## 1. Introducción

Las mediciones espectrales son cada vez más frecuentes en una gran cantidad de campos y aplicaciones. Los espectroradiómetros de matriz de arreglo se destacan sobre los de escaneo mecánico gracias a la capacidad de adquirir más rápidamente la distribución espectral de una fuente [1]. Estos espectrómetros de matriz o espectrógrafos son bastante utilizados actualmente debido a que son instrumentos compactos, rápidos, relativamente económicos y fáciles de manejar [2,3,4]. Sin embargo, a causa del elemento dispersante en el interior de estos dispositivos, la luz descompuesta en el instrumento en diferentes longitudes de onda se desvía, lo que hace que componentes de cierta longitud de onda, incidan en fotodetectores destinados a la medición de otras longitudes de onda. Este efecto se evidencia especialmente en la medición de un componente espectral de bajo nivel de una fuente de banda

ancha. Por lo tanto, para obtener una medición correcta, se hace necesario la corrección de luz extraviada.

En esta propuesta, se desarrolla la calibración de luz extraviada a partir de la caracterización de la respuesta espectral de un espectrómetro de matriz comercial, a un conjunto de líneas espectrales monocromáticos, con FWHM aproximado de 4-9 nm, los cuales son generados mediante el uso de un monocromador que filtra el espectro de una fuente de luz incandescente más una fuente de deuterio, y cubre el rango espectral entre 300nm - 700 nm.

## 2. Corrección de luz extraviada

Este apartado describe el modelo matemático para la corrección de luz extraviada de acuerdo con el método de Zong *et al* [1]. A partir de la caracterización de la respuesta espectral del espectroradiómetro, se encuentra la relación de cómo una la luz que ingresa y debe ser detectada solo por un píxel específico, afecta a los demás, lo que conlleva a un aporte de luz parásita; es así como se obtiene una matriz de distribución de señal de luz extraviada espectral, que cuantifica la magnitud de la señal de luz parásita espectral dentro del instrumento. Mediante el uso de estos datos, se deriva una nueva matriz de corrección de luz parásita espectral y la respuesta del instrumento se puede corregir con una multiplicación de matrices.

La caracterización del instrumento se lleva a cabo mediante la excitación del detector, por medio de luz monocromática de un ancho a media altura (FWHM) estrecho o banda angosta; para ello, las opciones son múltiples: como láseres, filtros, conjuntos de monocromadores o doble-monocromadores, entre otros. Uno de los puntos claves, es en la medida en lo posible se cubra todo el rango espectral del equipo. Además, que la luz de excitación llene uniformemente la ranura o “slit” de entrada del instrumento.

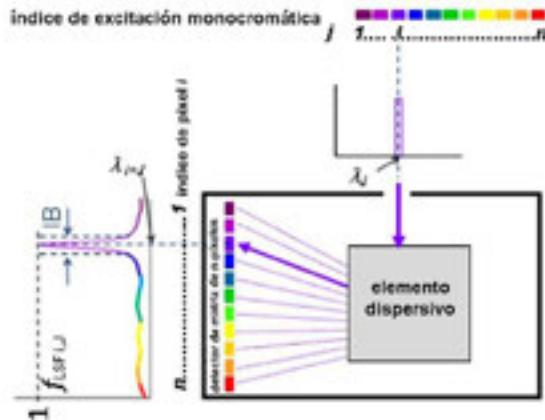


Fig 1. Ilustración de la caracterización del detector de matriz de  $n$  píxeles a partir de luz monocromática espectral; se determinan funciones de propagación de línea, LSF. Tomado y modificado de [3]

La figura 1 ilustra el procedimiento. Suponga que el detector del espectroradiómetro tiene  $n$  píxeles y la luz que entra a este es monocromática de banda angosta con longitud de onda igual a  $j = J$ ; debido a la resolución óptica del equipo el píxel con longitud de onda  $\lambda_i = J$  y los píxeles vecinos van a recibir la luz de la emisión monocromática, todos los demás píxeles van a recibir un pequeño aporte de la luz que corresponde a la luz parásita. La relación que describe la respuesta relativa de un espectrógrafo en cada elemento  $i$  a una excitación monocromática fija en la longitud de onda  $\lambda_i$  que cae sobre el elemento  $j = J$  se llama función de dispersión de línea espectral (LSF), denotada por  $f_{\text{LSF},i,j}$ . El LSF describe la luz parásita espectral y es conceptualmente equivalente a la función de dispersión de puntos que se utiliza para describir la respuesta espacial de luz parásita de un instrumento [1].

En la parte superior de la figura 2, se ilustra la función de dispersión de línea LSF, cuando se excita un espectrómetro que tiene un detector de matriz con 2048 células fotodetectoras o píxeles. La longitud de onda que tiene mayor aporte espectral corresponde a 513 nm. En un caso ideal únicamente solo una banda angosta de píxeles debería ser estimulada por la luz monocromática. El ancho de esta banda depende, especialmente, de la resolución óptica del equipo. Los píxeles, fuera de dicha banda deberían registrar un valor igual a cero; sin embargo, cualquier píxel  $i$  que no se encuentre en la banda estimulada (IB) también registra un valor no nulo, debido a la luz extraviada. La respuesta del instrumento se puede separar en una región de pico estrecha sobre el elemento  $J$  y la región amplia restante de baja respuesta. La región de pico angosto corresponde al paso de banda del instrumento, y la señal en esta región espectral se denomina respuesta en banda (IB). La señal en la región amplia restante surge de la luz parásita espectral. Por lo tanto, la respuesta espectral del espectrógrafo puede describirse mediante el uso de dos índices,  $i$  y  $j$ ;  $i$  expresa una

salida de un elemento de matriz individual, y  $j$  se refiere a la longitud de onda, en el espacio de píxeles, del flujo radiante incidente que se mide.

A partir de la función de dispersión de línea  $f_{\text{LSF},i,j}$  se deriva lo que se denomina función de distribución de señal de luz extraviada espectral, (SDF, siguiendo la notación de Zong), y se denota  $d_{i,j}$ , esta se calcula normalizando el  $f_{\text{LSF},i,j}$  al área total de la respuesta en banda IB, y estableciendo cualquier valor dentro del área de IB como cero. Matemáticamente esto se describe como:

$$d_{i,j} = \frac{f_{\text{LSF},i,j}}{\sum_{i \in \text{IB}} f_{\text{LSF},i,j}}, \notin \text{IB} (\text{pixel } i \text{ fuera de IB})$$

$$d_{i,j} = 0, \quad \in \text{IB} (\text{pixel } i \text{ dentro de IB})$$

$$i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

En la parte inferior de la figura 2 se ilustra la función distribución de luz extraviada espectral de  $d_{i,j}$  derivada de la correspondiente  $f_{\text{LSF},i,j}$  para la longitud de excitación  $j = 513 \text{ nm}$ . A partir de la caracterización

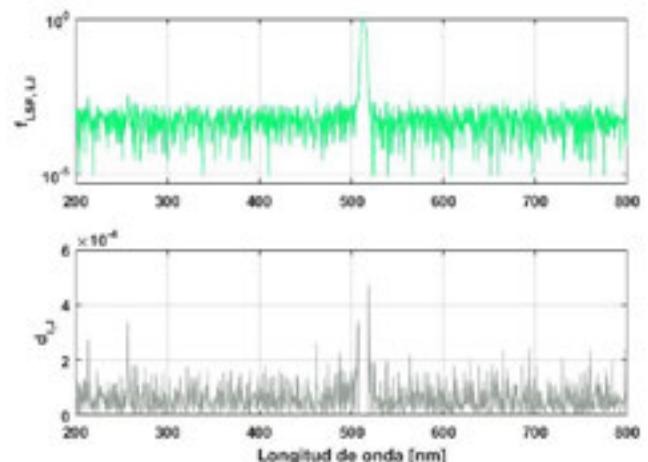


Fig 2. Superior: Ilustración de la función de dispersión de línea espectral LSF para una excitación  $\lambda_j = 513 \text{ nm}$ . Inferior: Ilustración de la función distribución de luz extraviada espectral SDF correspondiente.

Con las funciones de distribución de luz extraviada para cualquier píxel  $i$  correspondiente a cada longitud de onda de excitación  $j$  y excitando todo el rango espectral del equipo, se puede caracterizar completamente el equipo, así se puede crear una matriz de distribución de luz extraviada espectral, en donde las columnas corresponden a las funciones de distribución  $d_{i,j}$ .

$$\mathbf{D} = [d_{i,1} \quad d_{i,2} \quad \dots \quad d_{i,n}] = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & \dots & d_{2,n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n,1} & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sería demasiado dispendioso, e implicaría el uso de equipo bastante sofisticado lograr tener una función de distribución para cada píxel de la matriz CCD, así que aunque  $d_{ij}$  cambia a lo largo del rango del equipo, este cambio es suave según la literatura, esto permite que se puedan tomar mediciones con intervalos entre 5 nm a 8 nm sin que haya un cambio brusco en la función de dispersión de línea [1], y realizar interpolaciones y extrapolaciones en los espacios vacíos, con el fin de encontrar la matriz  $D$  de tamaño  $n \times n$ .

Cuando se mide una fuente de banda ancha, la señal total de la luz extraviada espectral para cualquier píxel  $i$ ,  $Y_{s\_spec,i}$  es la suma de todas las contribuciones de luz parásita espectral del espectro de la fuente, matemáticamente se describe como en (3), y se podría usar la aproximación descrita:

$$Y_{s\_spec,i} = \sum_{j=1}^n d_{i,j} \cdot Y_{IB,j,true} \approx \sum_{j=1}^n d_{i,j} \cdot Y_{IB,j}, \quad (3)$$

donde  $Y_{IB,j,true}$  es la señal en banda (IB) verdadera de la fuente en el elemento  $j$ , que es proporcional a la potencia incidente total de la fuente dentro del ancho espectral del elemento  $j$ , y  $Y_{IB,j}$  es la señal en banda (IB) total en el elemento  $j$  que surge de la incidente potencia de la fuente dentro del rango espectral de IB en el elemento  $j$ . Esto solo aplica asumiendo que la fuente medida de banda ancha no se extiende más allá del rango medible de un instrumento. La señal total medida por el instrumento para un elemento  $i$ ,  $Y_{meas,i}$  corresponde a la suma de la señal en banda total en el píxel más todos los aportes de luz extraviada,

$$Y_{meas,i} = Y_{IB,i} + Y_{s\_spec,i} = Y_{IB,i} + \sum_{j=1}^n (d_{i,j} Y_{IB,j}) \quad (4)$$

La ecuación (4) se puede reescribir de forma matricial como sigue,

$$\begin{aligned} Y_{meas} &= Y_{IB} + Y_{s\_spec} = Y_{IB} + D \cdot Y_{IB} \\ Y_{meas} &= [I + D] \cdot Y_{IB} = A \cdot Y_{IB} \end{aligned} \quad (5)$$

en donde  $Y_{meas}$  es un vector de columna de  $n$  elementos con las señales medidas,  $Y_{IB}$  es un vector de columna que representa las señales IB de los  $n$  elementos,  $D$  es la matriz de distribución de luz extraviada espectral de la ecuación (2),  $A = [I + D]$  es una matriz de cuadrada de orden  $n$  e  $I$  es la matriz de identidad de tamaño  $n \times n$ .

De esta forma se puede obtener  $Y_{IB}$  calculando la matriz inversa de la matriz  $A$ , denotada  $C$  y denominada típicamente matriz de corrección de luz extraviada espectral.

$$Y_{IB} = A^{-1} \cdot Y_{meas} = C \cdot Y_{meas} \quad (6)$$

En algunas ocasiones la matriz  $A$  no es singular, lo que hace el enfoque de inversión matricial no sea plausible, así que la ecuación (5) se puede resolver con el enfoque iterativo convencional mediante el uso de la siguiente relación de recursión:

$$\begin{aligned} Y_{IB}^{(k+1)} &= Y_{meas} - DY_{IB}^{(k)} \\ k &= 0, 1, 2, \dots, \\ Y_{IB}^{(0)} &= Y_{meas} \end{aligned} \quad (7)$$

Por supuesto, el enfoque iterativo es en general más lento, pero puede usarse para validar el enfoque de inversión matricial.

### 3. Implementación Experimental

En la práctica se realizó la calibración de luz dispersa para un espectrógrafo de matriz CCD en el rango visible, para la validación se llevaron a cabo tanto el enfoque matricial como el iterativo, las características del equipo de prueba se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del espectrómetro de prueba

Referencia	USB2000, Marca: Ocean Optics
Número de elementos detector:	2048 píxeles
Rango del detector:	200-1100 nm
Tamaño del slit	10
Resolución óptica:	~3 nm FWHM
Tiempo de integración:	3 milisegundos a 65 segundos
Resolución analógico-digital	16 bits. (65536 cuentas)

En lugar de usar un conjunto de láseres o filtros para generar la luz monocromática se utilizó un monocromador, cuyas características se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del monocromador utilizado

Referencia	Monocromador CS2000
Marca:	Ocean Optics
Rango de longitud de onda	300-700 nm
FWHM	4-9 nm
Exactitud	<0.5 nm
Repetibilidad	0.2 nm
Dispersión	Aproximadamente 10nm/mm

Para caracterizar la respuesta espectral del espectrógrafo se utilizaron 80 líneas espectrales, con longitudes de onda espaciadas tan quasi-equidistantemente 5 nm; sin embargo, en 3 casos la distancia fue de aproximadamente 10 píxeles de distancia. Además, se garantizó una iluminación uniformemente de la ranura de entrada o “Slit” del espectrógrafo mediante el uso de una fibra óptica de conector SMA.

En la figura 3, se muestran todas las líneas espectrales con la que se excitaron el detector CCD del espectrómetro, como se puede apreciar existe un aporte sustancial de luz extraviada desde las longitudes de onda correspondientes del color verde al rojo que queda reflejado en el rango de 250 a 350 nm.

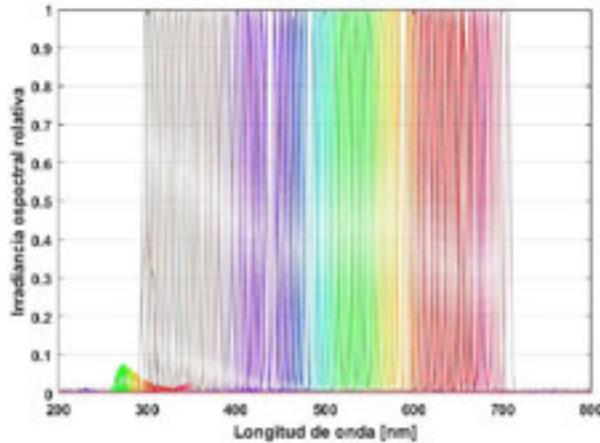


Fig 3. Conjunto de espectros generados con el monocromador de la tabla 2 para caracterización del equipo, el color de las líneas corresponde a la longitud de onda.

En la figura 4 se muestran varios LSF representativos que abarcan la matriz de detectores. La señal de luz parásita espectral generada es bastante baja, del orden de  $10^{-3}$ , se muestran funciones de dispersión de línea espectral correspondientes a las longitudes de onda 343.4, 448.2, 553.1 y 656.4 nm. Para las dos últimas se aprecia una joroba a la izquierda de los picos en banda (IB), que probablemente se debe a respuesta espectral de la rejilla de dispersión.

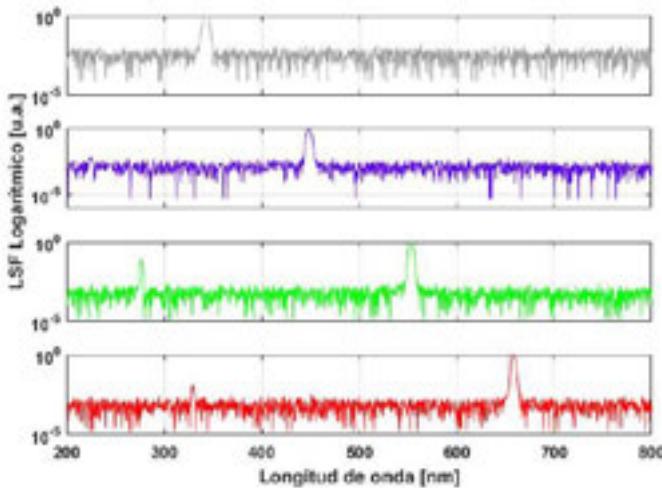


Fig 4. LSFs representativos que abarcan la matriz de detectores del espectrógrafo de prueba.

Cada LSF medido,  $f_{LSF\ i,j}$ , se usó para derivar el SDF correspondiente,  $d_{i,j}$ , con la ecuación (1). Cada  $d_{i,j}$  llenó la

columna correspondiente  $j$  de la matriz SDF, denominada  $\mathbf{D}$ . Las columnas intermedias entre las columnas derivadas se llenaron por interpolación de la columna conocida llenada  $d_{i,j}$ , mientras que las primeras y últimas columnas se llenaron por extrapolación.

Ya que la efectividad de las correcciones de luz parásita, utilizando los resultados de la caracterización de LSF, está garantizada solo mientras el rango espectral del instrumento coincide con el rango espectral del detector de matriz [5]. En este caso particular, el rango del monocromador es mucho menor que el rango del especlómetro de prueba; así que, solo se puede calibrar el rango de 300-700 nm del equipo, lo que sigue siendo de utilidad, especialmente, para mediciones del rango visible, para ello se debe recortar la matriz  $\mathbf{A}$ . Una vez calculada  $\mathbf{A}$  se calculó el número de condición. El resultado fue igual a 1.1775, muy cerca al número de condición de una matriz de identidad. Esto indica que la solución calculada por el enfoque de inversión de matriz no es sensible a pequeños errores en la matriz SDF.

La figura 5 muestra el mapa de color de la matriz  $\mathbf{D}$  recortada para la sección que se utiliza (300-700 nm). En la diagonal superior los valores corresponden a 0, en donde se encuentra la región en banda, mientras que el resto de los elementos son 3 órdenes más pequeños que la unidad. La línea predominante en la esquina superior derecha concuerda con la joroba de la figura 3 entre 250 y 350 nm.

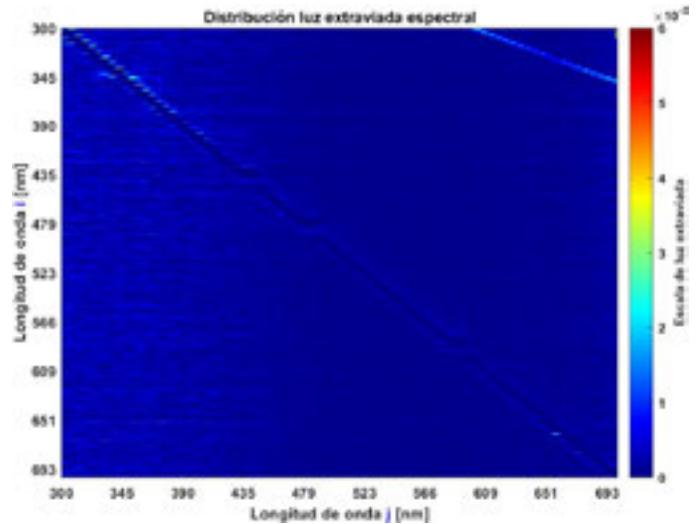


Fig 5. Mapa de color de la matriz de distribución de luz extraviada.

#### 4. Análisis de Resultados

Para evaluar el efecto de la calibración de luz dispersa se consideran diferentes escenarios en donde se estudia el efecto de la variación del espectro y su correspondiente cromaticidad. Se multiplica por la matriz de corrección de la ecuación (6). Inicialmente, se considera que el espectro medido corresponde

a un iluminante E, es decir, todos los valores de intensidad corresponden a la unidad. Los resultados se muestran en la figura 6.

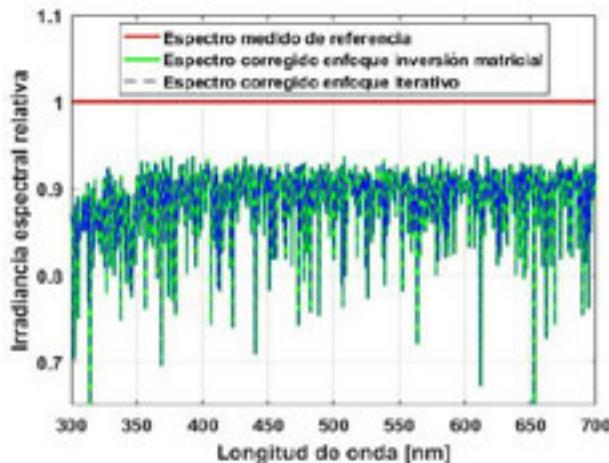


Fig 6. Corrección de un espectro igual al iluminante E por los dos enfoques mencionados.

Tanto el enfoque de inversión matricial como el iterativo convergen a, prácticamente, el mismo resultado con solo 3 iteraciones. Las diferencias son menores de  $10^{-3}$  para cada valor. Con el fin de evaluar el efecto de la calibración para un espectro de banda ancha, se evalúa una fuente de LED azul con fosforo de aproximadamente 4500 K de temperatura de color.

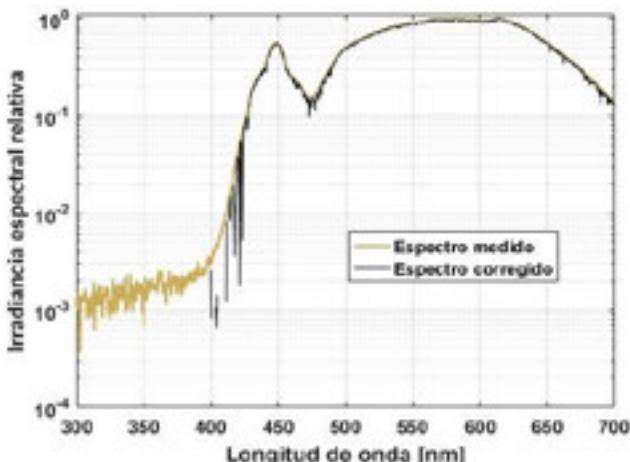


Fig 7. Corrección de un espectro de banda ancha, LED de fosforo, enfoque de inversión matricial.

Después de la corrección, las señales de luz extraviada espectral relativa se redujeron entre 1 y medio orden de magnitud para el rango de 400 a 450 nm, y en aproximadamente en 3 orden de magnitud para en rango de 300 a 350 nm, tenga en cuenta que en esta región la distribución de luz extraviada es máxima como se ha mostrado en las figuras 3 y 5.

Además, se evaluó el efecto de la calibración para mediciones de banda estrella. Para ello, se realizaron mediciones de leds monocromáticos comerciales con un ancho a media altura de aproximadamente 20 nm. La figura 8 muestra el espectro evaluado, así como el resultado de la calibración.

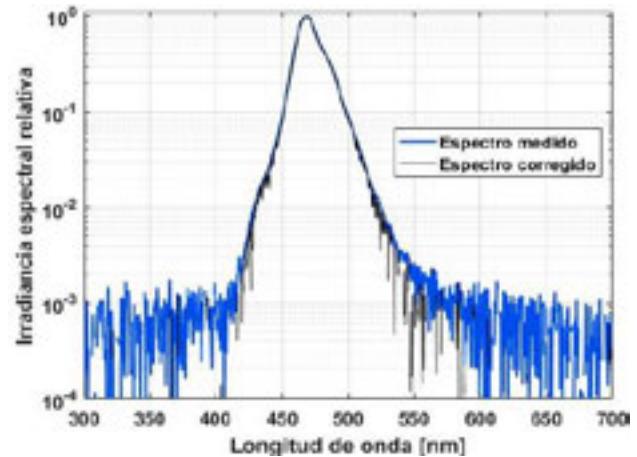


Fig 8. Corrección de un espectro de banda angosta, LED monocromático de 480 nm, enfoque de inversión matricial.

Luego de la calibración, los componentes fuera de la banda de excitación, que tienen un valor menor al 5% del valor máximo, se redujeron aproximadamente en un 74%; una reducción substancialmente menor en comparación con el espectro de banda angosta. Además, se estudiaron 2 LEDs más de 550 y 630 nm, con igual ancho a media altura. La reducción de los componentes fuera de la banda también fue del 74%. La variación de las coordenadas de color en el espacio CIE 1931 para el LED azul se muestran en la figura 9.

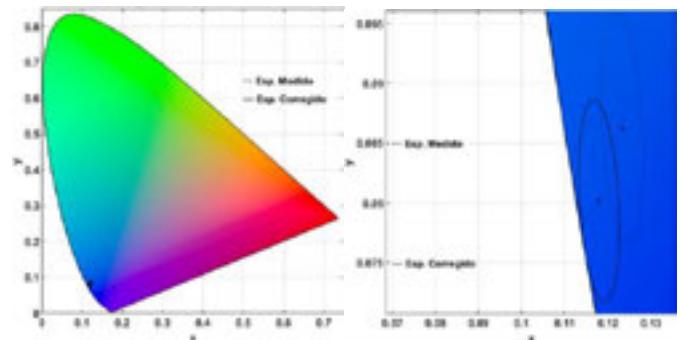


Fig 9. Variación de la cromaticidad de LED monocromático azul de la figura 8. **Izquierda:** diagrama de cromaticidad completa. **Derecha:** Acercamiento en donde se ve la cromaticidad del espectro medido y el espectro corregido, las elipses corresponden a elipses de MacAdam escaladas por un factor de 10.

Se ha desarrollado un software en Matlab que automatiza el proceso de calibración y muestra los resultados mostrados en este apartado junto con otros. La figura 10 presenta la interfaz gráfica. El software rectifica que los datos de la caracterización del equipo sean adecuados, en caso de tener información

errática la elimina y realiza la calibración; además, presenta la información colorimétrica tanto del espectro obtenido de la medición como del corregido.

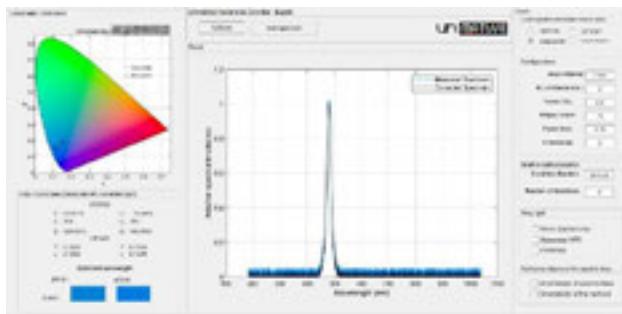


Fig. 10. Visualización de una de las ventanas del software de calibración, a izquierda el diagrama de cromaticidad junto con la información colorimétrica a derecha parámetros ajustables de calibración y de visualización de resultados, en el medio evaluación de espectros medidos y corregidos.

## 5. Recomendaciones y Conclusiones

Se ha implementado la calibración de luz extraviada espectral en spectroradiómetros con detector de arreglo, con una simple multiplicación matricial siguiendo el método de Zong *et al.* De esta forma, se reduce una de las fuentes importantes de incertidumbre en las mediciones espectrales.

En lugar de usar un conjunto de láseres sintonizables se ha utilizado un sistema con monocromador para caracterizar la respuesta espectral del instrumento a través de la excitación de fuentes monocromáticas de banda angosta, lo cual reduce considerablemente el costo de los equipos para hacer la calibración a costo de un error aceptable, debido a las imperfecciones del monocromador al dejar pasar la luz fuera de su banda.

Se ha verificado el efecto de la calibración de luz extraviada en fuentes de banda ancha y banda angosta, resultando en una reducción de la señal de luz parásita de hasta 3 órdenes de magnitud para fuentes de banda ancha y de un 74% para fuentes tipo LEDs monocromáticos comerciales.

Para la caracterización de la respuesta espectral del equipo es sumamente importante reducir al máximo posible la señal de ruido negro, además es importante usar filtros u otros elementos que impidan la contaminación de luz extraviada por componentes de longitud de onda diferentes a la banda espectral que se desea medir. Por otra parte, también es sumamente importante caracterizar todo el rango espectral del equipo medido, en la implementación presentada solamente se calibra una parte del rango del equipo.

Finalmente, se ha desarrollado una herramienta de software que automatiza la calibración por luz extraviada, que permite al usuario cambiar al usuario diferentes parámetros de la calibración y muestra resultados finales e intermedios de esta.

## 6. Referencias

- [1] Y. Zong, S. B. Brown, B. C. Johnson, K. R. Lykke, and Y. Ohno, "Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers," *Appl. Opt.* 45, 1111–1119 (2006).
- [2] Saber G. R. Salim, Nigel P. Fox, William S. Hartree, Emma R. Woolliams, Tong Sun, and Kenneth T. V. Grattan, "Stray light correction for diode-array-based spectrometers using a monochromator," *Appl. Opt.* 50, 5130–5138 (2011)
- [3] A Barlier-Salsi, "Stray light correction on array spectroradiometers for optical radiation risk assessment in the workplace" 2014 *J. Radiol. Prot.* 34 915.
- [4] S. Nevas, G. Wübbeler, A. Sperling, C. Elster, and A. Teuber, "Simultaneous correction of bandpass and stray light effects in array spectroradiometer data," *Metrologia* 49, S43–S47. (2012).
- [5] Saulius Nevas, Julian Gröbner, Luca Egli, and Mario Blumthaler, "Stray light correction of array spectroradiometers for solar UV measurements," *Appl. Opt.* 53, 4313–4319 (2014)
- [6] S. Nevas, M. Lindemann, A. Sperling, A. Teuber, and R. Maass, "Colorimetry of LEDs with array spectroradiometers," *MAPAN—J. Metrol. Soc. India* 24, 153–162 (2009).
- [7] CIE Technical Committee 1–48, "Recommendations concerning the calculation of tristimulus values and chromaticity coordinates," in *Colorimetry*, CIE Tech. Rep. CIE 15:2004, 3<sup>rd</sup> ed. (Commission Internationale de l'Eclairage, 2004), pp. 12–16.
- [8] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 2008. *Evaluation of Measurement Data—Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement—Propagation of distributions using a Monte Carlo method* Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008
- [9] Gardner J L 2006 Bandwidth correction for LED chromaticity Color Res. Appl. 31 374–80
- [10] Brown S W, Johnson B C, Feinholz M E, Yarbrough M A, Flora S J, Lykke K R and Clark D K 2003 Stray light correction algorithm for spectrographs *Metrologia* 40 S81–3
- [11] Kreuter A, Blumthaler M. Stray light correction for solar measurements using array spectrometers. *Rev Sci Instrum.* 2009;80(9):096108. doi:10.1063/1.3233897
- [12] Carsten Schinke, Maximilian Franke, Karsten Bothe, and Saulius Nevas, "Implementation and uncertainty evaluation of spectral stray light correction by Zong's method," *Appl. Opt.* 58, 9998–10009 (2019).
- [13] CIE 198-SP2:2018, "Determination of measurement uncertainties in photometry supplement 2: spectral measurements and derivative quantities", ISBN: .978-3-902842-11-4, DOI:10.25039/TR.198SP2.2018

## 7. Biografías

### *Miguel Ángel Chávez:*

Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, estudiante de maestría en Ingeniería Eléctrica y Auxiliar de investigación en el laboratorio de Ensayos Eléctricos industrial LABE.

### *Jesús M. Quintero Q.*

Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad. En 2015 obtuvo su doctorado en la Universitat politecnica de Catalunya, UPC – Barcelona Tech, Especialista en Automatización y Control Industrial de la Universidad Nacional de Colombia en 2007, Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia en 1992, se gradúo como Especialista en Informática y tecnología en Comunicaciones de la Universidad de Los Andes, Colombia en 2002. Desde 2004, ha estado en la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, donde ejerce como profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Su investigación se centra en medición, materiales luminiscentes y la calidad del color de las fuentes de luz. Actualmente ostenta el cargo de director general del laboratorio de Ensayos Eléctricos industrial LABE y director del grupo de investigación MATISSE.

# Educación a distancia de luminotecnia

Fernando Deco<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Asociación Argentina de Luminotecnia

<sup>a</sup>[ferdeco@gmail.com](mailto:ferdeco@gmail.com)

**Resumen**—Este trabajo muestra la implementación, desarrollo y experiencia obtenida que las nuevas tecnologías adaptadas a la educación de una ciencia es factible si se dispone de una percepción global del estudio que permite interactuar entre docente y alumnos y alumnos entre sí, posibilitando ampliar el material de estudios, compartir experiencias, normativas, problemas típicos, etc.

Llegando a varios países y varias provincias Argentinas, prueban que este tipo de sistema educativo marca el camino futuro, en el cual la docencia se debe unir a la tecnología, sin despreciar el aspecto educativo.

Transferir los conocimientos en esta modalidad posibilita la interacción entre docentes y educandos que con distintas normativas, realidades y profesiones, generan los cursos distintivos de esta modalidad a distancia.

Los resultados obtenidos en la implementación de la capacitación a distancia en luminotecnia de más de 10 años consecutivos, que posibilitó a muchas personas distantes del centro educativo, acceder a los conocimientos de esta ciencia y de las nuevas tecnología como el LED.

La Asociación Argentina de Luminotecnia ha implementado ésta modalidad a partir del año 2018 con una recepción extraordinaria por parte de los alumnos.

La experiencia adquirida desde el año 2010 en la Universidad Tecnológica Nacional, en donde surgió la educación a distancia en luminotecnia, permitió implementar a la AADL estos cursos al realizarse la Luxamerica 2018 en la ciudad de Córdoba, Argentina.

*Palabras clave.* Luminotecnia, enseñanza, educación a distancia.

## Abstract.

This work shows the implementation, development and experience obtained that the new technologies adapted to the education of a science is feasible if there is a global perception of the study that allows teachers to interact with students and students, allowing to expand the study material , share experiences, regulations, typical problems, etc.

Arriving in several countries and more than 16 Argentine provinces, they prove that this type of educational system marks the future path, in which teaching must be linked to technology, without neglecting the educational aspect.

Transferring knowledge in this modality allows the interaction between teachers and students that, with different regulations, realities and professions, generate the distinctive courses of this modality at a distance.

The results obtained in the implementation of distance training in lighting technology for more than 10 consecutive years, which enabled many people distant from the educational center, to access the knowledge of this science and new technology such as LED.

The Argentine Lighting Association has implemented this modality as of 2018 with an extraordinary reception by the students.

The experience acquired since 2010 at the National Technological University, where distance education in lighting technology emerged, allowed the AADL to implement these courses when the Luxamerica 2018 took place in the city of Córdoba, Argentina.

## 1. Introducción

Al redactar este documento no se había declarado la pandemia del Covid 19, que potenció enormemente la educación a distancia en todos los niveles.

Cabe señalar que cuando se esté realizan el congreso, se estará dictando el primer Diplomado de Latinoamérica en iluminación, totalmente a distancia y con docentes de diferentes países, lo que demuestra la efectividad de este sistema educativo. Para este diplomado, se han unido 4 asociaciones de los países de Guatemala, Argentina, Chile y Colombia.

Todo lo enunciado ratifica que es totalmente factible la enseñanza de luminotecnia a distancia.

Presentaré a continuación, como se desarrolló este último curso de la AADL, con la utilización de aula virtual mediante la plataforma Moodlecloud y video conferencia con la plataforma Zoom.

La enseñanza está cambiando con el advenimiento de nuevas tecnologías y acceso a la información, que tanto el alumno como el docente, tienen a disposición para el estudio.

Esta experiencia que se comienza a implementar en el año 2010, actualmente está en el vigésimo curso dictado en forma consecutiva, solo motivada por el interés que se ha despertado en la metodología y la transmisión boca a boca que han efectuado quienes lo han realizado.

## 2. Plataforma utiliza como aula virtual

El sistema de enseñanza se basa en la plataforma Moodle (Module Object-Oriented Dynamic Learning Environment, Entorno Modular de Aprendizaje Dinámico Orientado a Objetos) creada por Martin Dougiamas, Universidad Tecnológica de Curtin, Australia, de distribución libre y que constituye el aula virtual. Se complementa con la plataforma ZOOM, para videoconferencias con mensajería en tiempo real e intercambio de contenido.

La primera versión de la herramienta surgió el 20 de agosto de 2002 y al día de la fecha la base de usuarios registrados incluye más de 88 millones, distribuidos en 71.044 sitios que ofrecen 10 millones de cursos, traducidos a 86 idiomas en 233 países.

Por lo comentado está ampliamente probada la metodología de la plataforma y la enseñanza de la luminotecnia por éste método resulta interesante. Motivado por estos datos, se implementó el curso de Iluminación Arquitectónica Exterior a distancia. Este curso es 100% a distancia, es decir, se cursa y se aprueba a distancia.

La utilización de ésta tecnología, también conocida como LMS (Learning Management System), promueve una pedagogía constructivista social, promoviendo la colaboración, realización de actividades, reflexiones, críticas, intercambio de opiniones, etc., entre quienes imparten el curso y quienes lo reciben.

Para acceder al sistema, cada persona necesita sólo una cuenta para todo el servidor. Por otra parte, cada cuenta puede tener diferentes tipos de acceso. Con una cuenta de administrador que controla la administración de los cursos y determina a los profesores, asignando usuarios al curso.

### 3. Diseño curricular

El curso se desarrolla durante 12 semanas y está compuesto por 10 unidades académicas.

El cronograma de cursado, las autoevaluaciones, la disponibilidad de las unidades y la metodología de dictado, se publica al comienzo del curso en un archivo descargable, de manera que cada alumno sabe con anterioridad las fechas en que podrá acceder a cada aplicación en el aula virtual (campus).

Cada alumno accede al campus mediante una clave y el sistema lleva un informe detallado de la actividad que realiza cada participante.

En particular la implementación de este curso destina 10 semanas al cursado de los temas y 2 semanas para la realización del trabajo final de aprobación.

Es decir, cada tema de estudio está disponible 1 semana de manera que el alumno lo puede estudiar en cualquier momento y día que disponga. Se sube al campus un tema por semana y los anteriores se conservan para repaso.

Los alumnos tienen diferentes módulos dentro del campus para consultar, como ser:

- Módulo de tareas: se trata de un espacio en que el alumno puede subir un archivo de trabajo ante un planteo del profesor.
- Módulo de consulta: El profesor puede ver una tabla que presenta de forma intuitiva la información sobre los alumnos y que han visitado del campus.
- Módulo foro: Son espacios en donde se pueden intercambiar opiniones y consultas entre todos los participantes. Hay diferentes tipos de foros disponibles como ser, para los profesores, para noticias del curso, abiertos a todos, etc. En este curso se utiliza un foro por cada unidad académica, un foro para debatir el trabajo final y un foro abierto.
- Módulo cuestionario: Cada tema tiene asociado un cuestionario para autoevaluación en el cual se presentan varias preguntas mediante el sistema Multiple Choise, de manera de que el alumno pueda ver el avance en el estudio, ya que el sistema se ha configurado para abrir el cuestionario una sola vez y por un tiempo limitado.
- Módulo recurso: Aquí tanto los alumnos como el profesor pueden usar este espacio para subir archivos complementarios, fotos o imágenes, compartir publicaciones de distintos países, recomendar páginas web, videos, sonidos, etc.
- Módulo encuesta: Es un espacio para realizar preguntas del entorno o bien de conocimientos relacionados. Se ha utilizado para chequear al comienzo del curso las habilidades informáticas del alumno y de ser necesario se le hace llegar un manual instructivo de manejo sobre el campus. En los 7 cursos dictados no ha hecho falta este material ya que el campus es muy didáctico e intuitivo y no presenta dificultades.

### 4. Experiencia de cursado

La experiencia que hemos recogido con 20 cursos dictados, es la posibilidad de haber llegado a más de 15 países y 30 ciudades de Argentina y un abanico de profesiones y desarrollo laboral, que permitió un intercambio extraordinario en lo que respecta a las distintas normativas en países, diferentes actitudes ante la iluminación exterior en ciudades de argentina y la realización de proyectos sobre lugares reales.

Este último punto que se corresponde con el sistema de evaluación del curso, se trata de que cada alumno realice un proyecto de iluminación que se corresponda con lo visto en el curso, sobre un lugar de la ciudad donde habita y carezca de iluminación o bien merezca una reforma. Esto ha dado como resultado proyectos variados y de alto contenido conceptual, contemplando los parámetros de eficiencia lumínica, eficiencia energética y mantenimiento, base fundamental que se imparte en el curso.

Algunos alumnos eligieron lugares públicos, otros privados, otros religiosos, etc., pero de alto impacto en cada ciudad.

## 5. Composición del curso

Para que se comprenda el alcance de ésta metodología, que mediante el uso de material multimedia (textos imprimibles, videos desarrollados de cada tema, páginas web recomendadas, etc.) presento un resumen del temario en donde se puede apreciar el alcance y las posibilidades que permite este sistema.

- Descripción: El curso está integrado por 10 unidades a lo largo de las cuales los participantes interpretarán los conceptos luminotécnicos a partir de su vinculación con las actividades humanas. Se pretende que los participantes puedan proyectar una iluminación arquitectónica exterior con criterios técnicos lumínicos, eficiencia energética y mínima contaminación, uniendo los conceptos técnicos con las normativas vigentes y con la interpretación que iluminar no es solo colocar luces, sino, unirse a la arquitectura para mostrar un todo.

- Beneficios del Programa. Objetivo general: Interpretar los conceptos luminotécnicos a partir de su vinculación con las actividades humanas. Interpretar en forma armónica los principios de diseño lumínico y arquitectónico. Aplicar los principios técnicos de iluminación al desarrollo de proyectos urbanísticos, teniendo en cuenta criterios estéticos, ambientales, tecnológicos, psicosociales y de calidad.

- Metodología: El curso es a distancia, con la tutoría personalizada del docente quién; mediante foros de discusión guiará al alumno durante el desarrollo del mismo. Se podrá realizar consultas al docente a través de foros o chat. El material de lectura publicado semanalmente y las actividades propuestas serán de carácter grupal y/o individual y se realizará un trabajo final mediante el cual el alumno alcanzará la aprobación del curso. Además, se realizada una clase online virtual cada semana.

- El curso está desarrollado en 10 temas o módulos y a continuación se presenta en forma general su alcance.

- Módulo 1 - Conceptos fundamentales de luminotecnia.
- Módulo 2 - Características de los componentes de una instalación.
- Módulo 3 - Propiedades de los materiales en relación a la iluminación.
- Módulo 4 - Entorno turístico de una ciudad.
- Módulo 5 - Entorno visual de una ciudad.
- Módulo 6 - Planificación y mantenimiento.
- Módulo 7 – Proyectos.
- Módulo 8 - Iluminación urbana y calidad del espacio público.
- Módulo 9 - La luz en los espacios del arte y del evento.
- Módulo 10 - Polución lumínica.

Como puede desprenderse del análisis del temario y metodología, cada tema se puede desarrollar de una manera didácticamente conformada por texto, imágenes y videos, que complementada con foros de intercambio, preguntas y participación, hacen que cada tema no solo posea las características de lo que ha desarrollado el profesor, sino que se ve alimentada por preguntas y aportes que obligan y permiten ampliar el campo del conocimiento.

## 6. Material que dispusieron los alumnos

- Apuntes compuesto por instructivo de uso del aula y apuntes que contabilizaron 634 páginas de estudio.
- 10 Foros de consulta a razón de uno particular por tema.
- 9 vídeos grabados con una duración total de 1h 42' 44''
- Autoevaluaciones confirmar conceptos, una por tema.
- Clases online mediante el uso de Zoom con una duración total de 11h 45' y 196 diapositivas transmitidas en vivo.

- Todas las clases online fueron grabadas y quedan en poder de los alumnos.

## 7. Retroalimentación

Esta característica importante en la educación, que consiste en la retroalimentación que el profesor debe proporcionar a sus alumnos durante el desarrollo de tareas, problemas o preguntas, está muy desarrollada en el sistema Moodle.

El campus, como se mencionó, brinda la posibilidad de diagramar variadas actividades a los alumnos y cada una de ellas tiene asociada la retroalimentación que puede brindar el profesor, fundamentalmente por medio de los foros.

A continuación, se presenta en la figura 1, el abanico de actividades o recursos que puede utilizar el profesor para diagramar sus clases, tareas y evaluaciones.

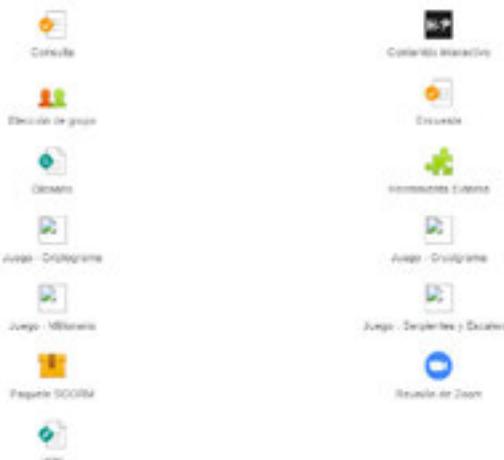
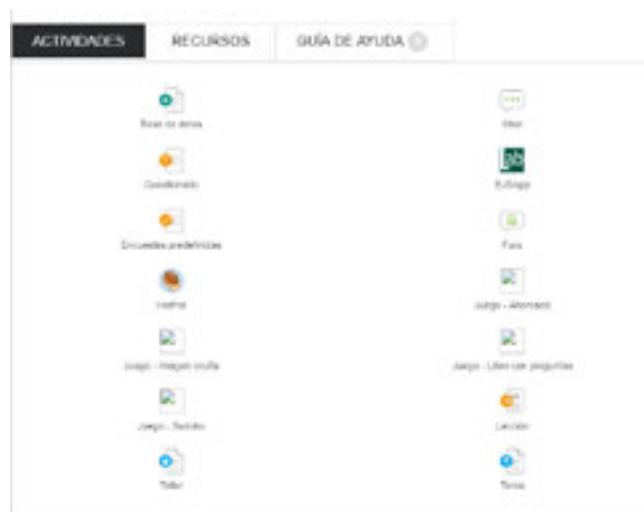


Fig 1. Actividades disponibles Moodle

Podemos observar que contamos con actividades diversas compuestas por 27 categorías.

Entre las principales, podemos enumerar las siguientes:

**Base de datos:** permite a los participantes crear, mantener y buscar información en un repositorio de registros. La estructura de las entradas la define el profesor según una lista de campos. Los tipos de campos incluyen casilla de verificación, menú desplegable, área de texto, URL, imagen y archivo cargado.

La presentación visual de la información a listar, ver o editar las entradas de la base de datos se controla mediante plantillas de base de datos.

Un profesor puede permitir comentarios en las entradas. Las entradas también pueden ser calificadas por profesores u otros estudiantes (evaluación por pares). Las calificaciones se agregarán para formar una calificación final que se registrará en el libro de calificaciones.

**Consulta:** permite al profesor hacer una pregunta especificando las posibles respuestas.

**Cuestionario:** permite al profesor diseñar y plantear cuestionarios con preguntas tipo opción múltiple, verdadero/falso, coincidencia, respuesta corta y respuesta numérica.

**Encuesta:** permite que un profesor pueda crear una encuesta personalizada para obtener la opinión de los participantes utilizando una variedad de tipos de pregunta, como opción múltiple, sí/no o texto.

**Foro:** permite a los participantes tener discusiones asincrónicas, es decir discusiones que tienen lugar durante un período prolongado de tiempo.

**Glosario:** permite a los participantes crear y mantener una lista de definiciones, de forma similar a un diccionario, o para recoger y organizar recursos o información.

**Herramienta externa:** permiten a los estudiantes interactuar con recursos educativos y actividades alojadas en otros sitios de internet. Por ejemplo, una herramienta externa podría proporcionar acceso a un nuevo tipo de actividad o de materiales educativos de una editorial.

**Lección:** permite a un profesor presentar contenidos y/o actividades prácticas de forma interesante y flexible. Un profesor puede utilizar la lección para crear un conjunto lineal de páginas de contenido o actividades educativas que ofrezcan al alumno varios itinerarios u opciones. En cualquier caso, los profesores pueden optar por incrementar la participación del alumno y asegurar la comprensión mediante la inclusión de diferentes tipos de pregunta, tales como la elección múltiple, respuesta corta y correspondencia. Dependiendo de la respuesta elegida por el estudiante y de cómo el profesor desarrolla la lección, los estudiantes pueden pasar a la página siguiente, volver a una página anterior o dirigirse a un itinerario totalmente diferente.

**Paquete SCORM:** es un conjunto de archivos que se empaquetan conforme a una norma estándar para los objetos de aprendizaje. El módulo de actividad SCORM permite cargar y añadir a los cursos paquetes SCORM o AICC como archivos zip.

**Taller:** permite la recopilación, revisión y evaluación por pares del trabajo de los estudiantes.

Los estudiantes pueden enviar cualquier contenido digital (archivos), tales como documentos de procesador de texto o de hojas de cálculo y también pueden escribir el texto directamente en un campo empleando un editor de texto (dentro de Moodle).

**Tareas:** permite a un profesor evaluar el aprendizaje de los alumnos mediante la creación de una tarea a realizar que luego revisará, valorará y calificará.

**Wiki:** permite a los participantes añadir y editar una colección de páginas web. Un wiki puede ser colaborativo, donde todos pueden editarla, o puede ser individual, donde cada persona tiene su propio wiki que solamente ella podrá editar.

**Reunión de Zoom:** le proporciona a los usuarios autorizados la habilidad para organizar reuniones en línea.

Veremos en la figura 2 los recursos que disponemos:



Fig 2. Recursos disponibles Moodle

Disponemos de los siguientes:

**Archivo:** permite a los profesores proveer un Archivo como un recurso del curso. Cuando sea posible, el archivo se mostrará dentro del interface del curso; si no es el caso, se le preguntará a los estudiantes si quieren descargarlo. El recurso Archivo puede incluir archivos de soporte, por ejemplo, una página HTML puede tener incrustadas imágenes u objetos Flash.

**Carpeta:** permite al profesor mostrar un grupo de archivos relacionados dentro de una única carpeta. Se puede subir un archivo comprimido (zip) que se descomprimirá (unzip) posteriormente para mostrar su contenido, o bien, se puede crear una carpeta vacía y subir los archivos dentro de ella.

**Etiqueta:** permite insertar texto y elementos multimedia en las páginas del curso entre los enlaces a otros recursos y actividades. Las etiquetas son muy versátiles y pueden ayudar a mejorar la apariencia de un curso si se usan cuidadosamente.

**Libro:** permite crear material de estudio de múltiples páginas en formato libro, con capítulos y subcapítulos. El libro puede incluir contenido multimedia así como texto y es útil para mostrar grandes volúmenes de información repartido en secciones.

**Página:** permite a los profesores crear una página web mediante el editor de textos. Una Página puede mostrar texto, imágenes, sonido, video, enlaces web y código incrustado (como por ejemplo los mapas de Google) entre otros.

**IMS:** permite mostrar dentro del curso paquetes de contenidos creados conforme a la especificación IMS.

**URL:** permite que el profesor pueda proporcionar un enlace de Internet como un recurso del curso. Todo aquello que esté disponible en línea, como documentos o imágenes, puede ser vinculado; la URL no tiene por qué ser la página principal de un sitio web. La dirección URL de una página web en particular puede ser copiada y pegada por el profesor, o bien, este puede utilizar el selector de archivo y seleccionar una URL desde un repositorio, como Flickr, YouTube o Wikimedia (dependiendo de qué repositorios están habilitados para el sitio).

Como se puede observar por la variedad de actividades y recursos disponibles en el aula virtual Moodle, un profesor puede adaptar y disponer de opciones múltiples para utilizar en el curso como complemento a las clases o para evaluaciones, de manera de tener un abanico de posibilidades para evaluar y calificar a los alumnos, ya sean individuales o por grupos.

Cada actividad o recurso que un profesor defina para ser evaluada, dispone de la posibilidad de retroalimentación para orientar o bien aclarar las respuestas o participaciones del alumno, de manera de que quede completamente definida una calificación, sin que medie una mala interpretación del alumno.

## 8. Requisitos para aprobar el cursado

Si bien, el sistema de aula virtual que proporciona la plataforma Moodle, brinda una variedad de actividades y recursos que permiten la evaluación del alumno, en la aplicación de las mismas en el dictado del curso sobre iluminación arquitectónica exterior, se pensó en adoptar un sistema de evaluación por fuera de lo que propone el campus, de manera de evaluar al alumno de una manera integral.

Se dispuso que para la aprobación del cursado y la obtención del correspondiente certificado que otorga la Asociación Argentina de Luminotecnia, que cada alumno presentara un trabajo final.

Este trabajo final consistía en la realización, por parte del alumno, de un proyecto de iluminación contemplando lo desarrollado en el curso. Lo que se dispuso fue que ese proyecto fuera sobre un espacio exterior, fachada, etc. que existiera en la ciudad donde reside el alumno y que careciera de iluminación o bien, se planteara una modificación.

## 9. Ejemplo de cursado

Este curso que constituye el único en su tipo en argentina, y cada alumno inscripto accede con un nombre de usuario y clave que asigna el profesor y es única para cada alumno matriculado.

Una vez que accede el alumno, el campus registra tanto el ingreso como toda la actividad que desarrolla dentro del aula virtual, de manera que el profesor puede saber qué tiempo le dedica cada alumno a sus actividades y recursos que ha implementado el docente. Esta actividad del alumno también puede ser evaluada y formar parte de la nota final o de aprobación del cursado.

Una vez registrado en el campus se accede a las pantallas del curso y el alumno puede recorrer las distintas secciones que lo componen, como ser: documentos a descargar, multimedia, foros de temas, autoevaluaciones foros, etc. Además, hay lugar para presentarse y compartir archivos. Mediante los foros se programan las clases online mediante zoom.

## 10. Conclusiones

Si bien la educación a distancia no puede abarcar o sustituir a todas las disciplinas, en el área de luminotecnia, una ciencia que abarca variados temas y que tiene como referentes a arquitectos, ingenieros, diseñadores, sicólogos, etc., se presta perfectamente para ser implementada bajo la modalidad a distancia en temas específicos, pero no en todo la ciencia luminotécnica, sobre todo en aquellos temas que implican prácticas de laboratorio, en donde es imposible reemplazarlos en el aula virtual..

La experiencia en estos 20 cursos dictados con más de 500 alumnos y los comentarios que nos han realizado, es la aceptación plena de la metodología y el pedido de otros temas, como ser un curso sobre iluminación interior, lo que demuestra que el sistema es eficaz para el aprendizaje.

Debido a que el campus admite subir archivos que no están programados, como ser aclaraciones, material de apoyo, ampliaciones, etc., da la posibilidad de nivelar a los alumnos de acuerdo a sus estudios y que puedan seguir el curso sin problemas. Todo pedido de apoyo ante fórmulas, desarrollos, etc., es atendido por el profesor con el aporte del material aclaratorio necesario y de esa manera se subsanan los inconvenientes que pueden causar los desniveles de conocimiento.

La posibilidad de realizar cursos con profesores ubicados en distintas ciudades y países posibilita una educación distinta que el alumno la valora, ya que poder interactuar con profesores destacados que se encuentren en distintas zonas geográficas, abre una posibilidad que de otro manera es imposible realizar.

La tecnología disponible de material multimedia, bandas de acceso a internet de velocidades aceptables, posibilita el desarrollo de cursos interactivos sin perder el profesor el control del avance de cada alumno, ya que al ingresar con una clave se lleva un registro de toda actividad.

El avance de las prestaciones de software a distancia potenciado por la pandemia que aqueja a muchos países, ha aumentado la prestación de la educación a distancia, por lo cual cuando se esté presentando este material, se estará desarrollando el 1er. diplomado latinoamericano de iluminación a distancia organizado por la unión de 4 asociaciones de latinoamerica, como ser Asociación Guatemalteca de Iluminación (AGI), Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL), Asociación Nacional de Alumbrado Público de Colombia (ANAP) y Centro de Investigación en Luz y Energía de Chile, en un nuevo curso de luminotecnia, que en esta oportunidad abarca la iluminación interior y exterior, con la participación de 10 profesores que impartirán sus clases online con todos los alumnos.

Este tipo de sistema aplicado a la educación está siendo denominado por muchas universidades como sistema MOOC, que lo brindan en sus portales o bien mediante una página web que concentra a varias universidades.

MOOC es el acrónimo en inglés de Massive Online Open Courses (o Cursos online masivos y abiertos) Es decir, se trata de un curso a distancia, accesible por internet al que se puede apuntar cualquier persona y prácticamente no tiene límite de participantes.

Un curso en línea abierta masiva (MOOC) es un curso en línea destinado a la participación ilimitada y acceso abierto a través de la web. Además de los materiales de un curso tradicional, como son los videos, lecturas y cuestionarios, los MOOC proporcionan forums de usuarios interactivos que

ayudan a construir una comunidad para los estudiantes, profesores y los asistentes técnicos.

Se puede considerar a David Wiley como el autor del primer MOOC conceptual, iniciado en la Universidad de Utah en agosto de 2007. Se trataba de un curso de educación abierta. Esta iniciativa tuvo continuidad en numerosos proyectos impulsados desde diferentes centros universitarios dentro y fuera de los Estados Unidos.

Por la experiencia desarrollada en este tema y el desarrollo que se está llevando en el mundo educativo, es necesario que los docentes lo consideren para sus cursos y que alumnos distantes de los centros educativos puedan acceder sin tener que desplazarse de sus lugares de origen.

## 11. Referencias

Página oficial de Moodle: moodle.org (último acceso setiembre de 2020).

Universidad de Barcelona, página web:  
<http://www.uab.cat/web/estudiar/mooc/-que-es-un-curso-mooc-1345668281247.html> (último acceso agosto 2016)

Página portal Miriada X, <https://miriadax.net/cursos> (último acceso agosto 2020)

Arq. Marta Micaela Gómez - La enseñanza del siglo XXI y la luminotecnia – Revista Luminotecnia N° 11 marzo/abril 2012 – ISSN 0325-2558 – R.N.P.I. 935153

# Parque Batlle, la cultura y el deporte como una realidad viva

Arq. Valeria Acosta<sup>1,a</sup>, Arq. Andrés Souto<sup>2,b</sup>, Ing. Pablo Chavarría<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Intendencia de Montevideo

<sup>a</sup> [valeria.acosta@imm.gub.uy](mailto:valeria.acosta@imm.gub.uy).

**Resumen**— El trabajo revaloriza la identidad de uno de los parques más emblemático y concurrido de la ciudad de Montevideo. Se realizó un estudio histórico, urbano, cultural y social que define un concepto del parque para la noche y el día. La intervención lumínica y tecnológica permite al visitante del parque realizar una lectura de este concepto transitando por una senda virtual y física simultáneamente. En el recorrido se comparte conocimiento estableciendo vínculos con el espacio, reflexionando sobre la historia y sus relaciones con el presente. El fomento de las actividades físicas y deportivas vinculadas con lo cultural, lo educativo y lo lúdico apuesta a generar valor en la relación del visitante con el parque. Se consolidan e integran espacios favoreciendo la inclusión, la democratización y la igualdad de género. La obra realizada también contribuye a mejorar la movilidad, la percepción emocional y la seguridad de los visitantes.

*Palabras clave. Identidad parque concepto iluminación inclusión*

## 1. Introducción

El Parque Batlle localizado en el centro de la ciudad de Montevideo (Fig. 1) capital de la República Oriental del Uruguay, con una extensión de 45 ha, tuvo como destino convertirse en la pieza urbana alrededor de la cual se desarrollaría la expansión de la ciudad a principios del siglo XX.

El diseño inglés pintoresquista configura la modalidad proyectual de los parques públicos a fines del siglo XIX, realizado por Édouard André y Carlos Thays.



Figura 1.

## 2. Definición del Concepto

Si tomamos en cuenta los hechos históricos de creación y significación a lo largo de la historia, las intervenciones realizadas en el presente y el uso que los visitantes y vecinos le dan al parque podemos definir el concepto del parque y su representación lumínica y tecnológica.

### 2.1- Análisis Histórico [1]

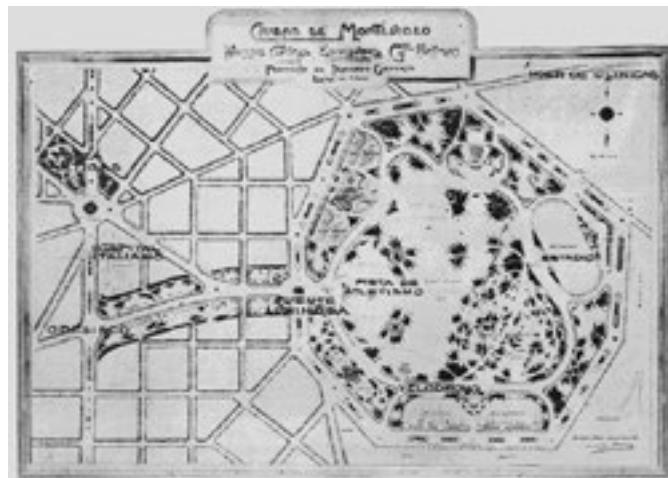
El análisis histórico y cronológico se resume en los siguientes puntos:

1.- En la memoria del proyecto original de Édouard André de 1891, concebido como un parque popular y de uso masivo. Se proponía crear una “**academia de los deportes o juegos populares**”, pero el plan no se concretó con equipamiento deportivo específico, predominando equipamiento de carácter cultural y educativo;



Edouard André. “Ciudad de Montevideo. Proyecto de creación del Parque Central. Incluyendo el jardín zoológico de aclimatación, el jardín botánico y el Museo de historia natural”. 1891 (Archivo IHA-FADU)

2.- En el proyecto de Thays para el parque Central



Carlos Thays. "Ciudad de Montevideo. Parque Central, Boulevard Gral. Artigas y Adyacencias. Proyecto de trazado general" \_fechado: 15 de junio de 1911. (Archivo IHA-FADU)

Thays propone al sur de la entrada, un gimnasio y viveros e invernáculos (actualmente remplazados por el Velódromo oficial), al norte un Jardín Botánico en abanico y un Museo de Bellas Artes, al este un Stadium de football (allí se localizó en 1930 el Estadio Centenario proyectado por el Arq. Scasso), en el centro, 3 *pelousses* de recreo (la ubicada al W fue ocupada por la Pista Oficial de Atletismo) y al sur un Jardín Zoológico y un lago con islas (ninguno de los dos fue construido, sitio actualmente ocupado por canchas de football). Thays indicó plantar árboles de especies autóctonas (tipas, araucarias y jacarandás) y de especies exóticas (plátanos, eucaliptus y palmeras).

El trazado propuesto por Thays es el que ordena actualmente el sector oeste del parque, pero, nunca se lo equipó con ninguno de los edificios y atracciones previstas (salvo el estadio), no se construyó el lago y su área sur fue colonizada por instalaciones deportivas.

2.- En 1930 se inaugura el Estadio Centenario por el Arq. Juan Scasso. Actualmente monumento histórico del fútbol mundial.



Parque de los Aliados [antes Central, actual José Batlle y Ordóñez]. Al fondo el Estadio Centenario, al frente la Pista Oficial de Atletismo. 1930 (Archivo CDF)

- 3.- En 1935 la Pista de Atletismo y el Velódromo Municipal;
- 4.-En 1943 el Estado inaugura el edificio pabellón de la pista de atletismo, donde hoy funciona el Instituto Superior de Educación Física (ISEF) de la Universidad de la República;
- 5.- En 1975 el Parque es designado Monumento Histórico Nacional
- 6.- En la última década se incorporó un circuito aeróbico de 1300m, bicisendas, varias estaciones deportivas con kit de juegos saludables y recientemente con la modalidad de propuesta participativa, la futura construcción de un pump truck
- 7.- Con esta intervención se agrega un segundo circuito aeróbico de 1.400m;

## 2.2- Análisis Urbano [2] y [3]



Figura 2

En la fig. 2 se ilustra la imagen aérea del Parque Batlle.



Figura 3.

En la figura 3 se ilustran las sendas principales y secundarias, y el trazado vehicular interno, red que oficia de conectores y ordenadores del parque. Transitando por ellas se puede observar y apreciar todo el equipamiento y captar la atmósfera del espacio. El borde del parque está conformado por una avenida con cantero central por donde fluye una bicisenda que forma parte de la red de movilidad activa de la Ciudad.

Se identifican cuatro zonas bien diferenciadas, zona noroeste, que conserva lo proyectado por Thays en 1911. Contiene mayoritariamente las obras escultóricas más importantes que representan las últimas guerras civiles, la vida a fines del siglo XIX y la transición al posmodernismo, la conquista de derechos, la investigación, la salud, el trabajo, la educación y el deporte. La zona centro donde se ubica la pista de atletismo, el ISEF y en su parte norte la extensión más grande de vegetación. La zona este donde se encuentra el Estadio Centenario y la zona Sur, donde se encuentra el velódromo, el club de tiro y dos instituciones deportivas privadas. Es la zona donde se está perdiendo el carácter de parque.

El nodo del parque sin lugar a duda es el monumento a la Carreta del escultor José Belloni, en el punto más alto.



El mojón del parque es la Torre de los Homenajes del Estadio Centenario.

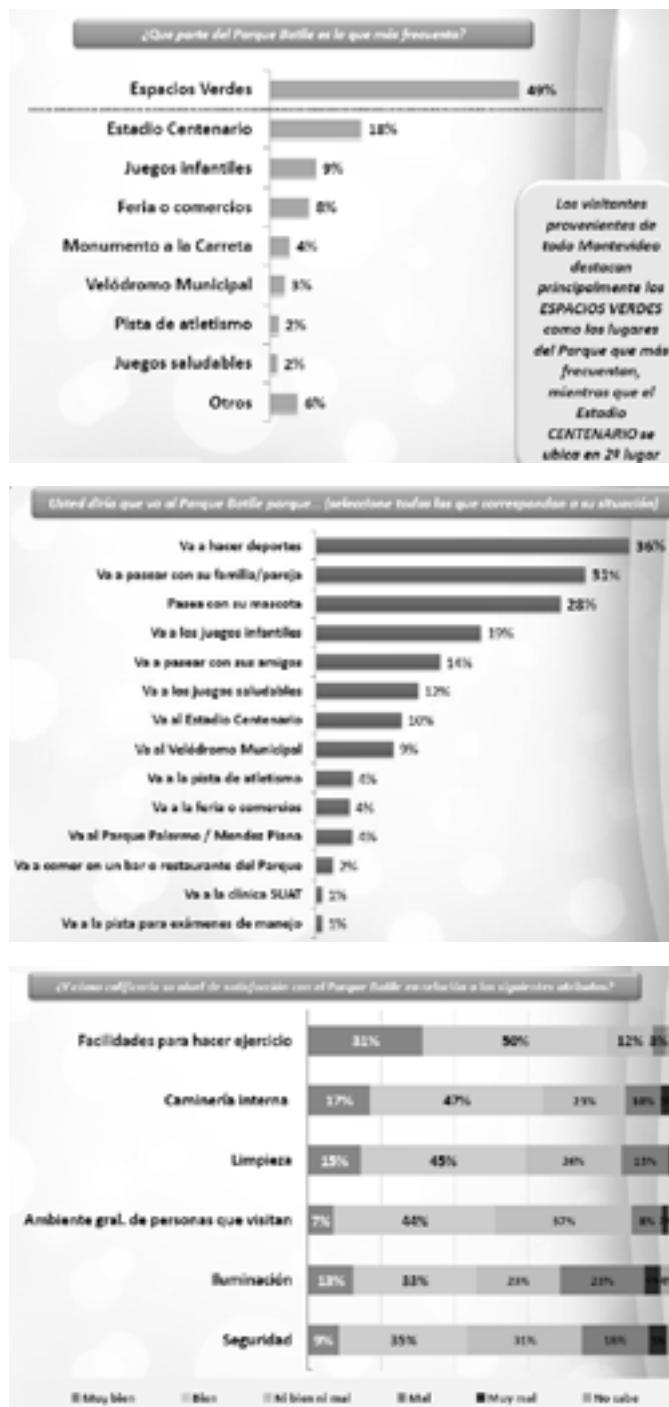


### 2.3- Análisis Social [4]

El estudio social recogió los insumos necesarios para generar instrumentos de aplicación, permitió conocer las percepciones y usos habituales que se desarrollan en el Parque Batlle. La investigación se desarrolló en tres fases: a.- Fase cualitativa, donde se estudió la necesidad de conocer el vínculo, usos y valoración del parque de los vecinos de la zona como de sus visitantes.; b.- Fase antropológica, lo que incluyó el estudio por franjas etarias, género y nivel de formación académica, complementando con etnografías panorámicas en diferentes días y horarios; c.-Fase cuantitativa dirigido a vecinos del parque con un nivel socio económico medio y medio alto.

Esta metodología permitió conocer las percepciones y significados, el impacto etnográfico y su afectación y la evaluación de diferentes necesidades. Se ilustran en las tres gráficas siguientes, que zona es la que mayormente se frecuenta, que es lo que se va a hacer y cómo evalúa el parque. De los resultados obtenidos, el 54 % de los vecinos del Parque que lo visitan, lo hacen para hacer o vincularse con los deportes, en cuanto a la evaluación general del parque es positiva, sin embargo, para los vecinos de la zona como para los visitantes, la iluminación (mala, muy mala 27%), la seguridad (mala, muy mala 23%) y la fragmentación de los

espacios del parque son los aspectos peor evaluados (la visita se estima en 400.000 personas en un período de 3 meses).



Además, baja sensiblemente la concurrencia de los visitantes al parque en las horas del día y de la noche, de un 57% a 38%.

## 2.4- Concepto

Si consideramos los tres análisis en la vida del parque, se puede observar que existe una identidad a lo largo de los años dada por el propósito del parque, las capacidades que se generan y el relacionamiento con los visitantes y vecinos. Esta trilogía es cambiante a lo largo del tiempo, pero la identidad cultural y deportiva se mantiene.

Como síntesis surge el concepto de “**la cultura y el deporte**” representando la identidad y el movimiento temporal; “**como una realidad viva**” donde la intervención trasciende el estudio racional y pragmático en su diseño, incorporando elementos significativos que estimulen y faciliten las distintas actividades físicas, recreativas y culturales, consolidando espacios democráticos, inclusivos y con igualdad de género.

Es así como surge la necesidad de un diseño lumínico y tecnológico que contemple **la cultura y el deporte como una realidad viva**.

El objetivo de esta intervención es consolidar espacios aptos para el desarrollo de actividades recreativas y deportivas, utilizando nuevas tecnologías y cumpliendo con los requerimientos lumínicos óptimos en cada superficie.

## 3. Diseño

El diseño considera los siguientes aspectos:

- El concepto
- Los elementos de la imagen pública
- Atender las demandas de los visitantes y vecinos

Se consideraron dos sistemas en el diseño, el sistema lumínico, efecto y equipamiento en la noche y solo el equipamiento en el día y el sistema de información y gestión de datos a través de una aplicación web para el móvil, que contextualiza el concepto.

### 3.1.- Sistema Lumínico

Toda la tecnología utilizada es Led, incorporando sistema de tele gestión con regulación de flujo lumínico por usos y presencia.

Se toma como premisas fundamentales en el diseño lumínico:

- No iluminar hacia el hemisferio superior
- No iluminar las grandes áreas verdes
- Generar fondos iluminados para favorecer el contraste
- Diferenciar con la intensidad y la tonalidad las distintas sendas
- Iluminar los espacios reunificativos
- Utilizar la misma tipología en todas las zonas para

evitar la fragmentación y dar la idea de continuidad

- Integrar la iluminación con el paisaje.
- No iluminar las especies vegetales

Se realizan las siguientes intervenciones lumínicas, a.- sobre las sendas principales y secundarias; b.-en los circuitos aeróbicos; c.- en los juegos saludables; d.- en los juegos infantiles; e.- en las esculturas; f.- en los edificios icónicos; g.- en lugares reunivos; h.- en el alumbrado vial (Se ilustra en la figura 4).



Figura 4.

- Senda primaria Em=15 lx, Umed>=0.5 Uext>=0.2 (3.000°K), separación 25m
- Sendas secundarias Em= 10 lx, Umed>=0.3, Uext>=0.1, (3.000°K), separación 30m

Luminarias Shuffle de Schréder



- Circuito aeróbico Em= 20 lx, Umed>=0.25, Uext>=0.1, (4.000°K)
- Alumbrado Vial Em=20 lx, Um>=0.5, Uext>=0.3, (3.000°K),

Para las esculturas se utilizaron luminarias modulares Shuffle de Schréder, que integran luz led para el espacio, proyectores led para las esculturas, WIFI, CCTV y Audio.



- Para los lugares reunivos y la iluminación de los edificios se buscaron soluciones distintas en base a bañadores y proyectores asimétricos.

Se diferencia en intensidad de luz cada una de las sendas y el borde. Los circuitos aeróbicos se describen en una tonalidad de color neutro y las sendas en tonalidad cálida.

### 3.2.- Sistema de Información [5]



Figura 5.

En la figura 5 se ilustra la arquitectura del sistema de Información. Se proyecta en el parque el tendido de fibra óptica para el servicio de comunicaciones, el cual dota a toda la superficie el WIFI. Los controladores de luminarias a través de la red DALI se conectan a través de un modem a la red de fibra óptica. La aplicación, los controladores y la geo posición del observador son datos que se gestionan en una aplicación en el servidor de la Intendencia, intercambiando datos e información y en horas de la noche interactuando con las luminarias. Se agregan programas de entrenamiento en juegos saludables y música en los juegos infantiles.

La inclusión de Fibra Óptica en todo el parque permite contar con circuito cerrado de televisión por seguridad

### 3.3.- Enfoque sistemático

Se combinan los dos sistemas para representar el concepto. A través de un recorrido por el parque: físico (por las sendas) y virtual (a través del móvil) el visitante va descubriendo la cultura y el deporte como una realidad viva. La actividad se puede realizar tanto en el día como en la noche.



Figura 6

El recorrido (fig.6) empieza en la Torre de los Homenajes del Estadio Centenario (Mojón), la escultura de Pierre de Coubertín, los juegos saludables, el circuito aeróbico, el Velódromo Municipal, juegos saludables, la pista de atletismo, círculo de palmeras, ISEF, círculo de palmeras, circuito aeróbico, La Maestra, 8 de marzo, Espacio Walt Disney, Guerra Civil, El Trabajo, Dr. Francisco Soca, Discóbolo, Campeones Mundiales, Foto galería, La Carreta y Visual del

Parque. Este recorrido es integrador en cuanto permite reconocer la globalidad del parque. El recorrido termina en el lugar más alto del parque de espalda al monumento más emblemático, La Carreta del escultor Belloni (Nodo), dejando atrás la vida sin tiempo y viendo el futuro de forma vertiginosa.



La aplicación es un relato de la significación del parque de sus arquitecturas y esculturas. Se promociona la cultura, se acentúa la actividad física, se le da un soporte correcto al uso deportivo, se compone la pluralidad de espacios como parte de un solo elemento, experimentando el efecto de la iluminación en las emociones colectivas al intervenir en edificios icónicos y esculturas “como una realidad viva”.

## 4. Resultados

La ejecución de la obra se constituyó en dos etapas, 1 instalación lumínica, 2 instalación de datos, aplicación web y CCTV. Hoy está finalizada la primera etapa y se está trabajando en la segunda etapa.

Para conocer los resultados de esta primera etapa se realizó un estudio social nocturno en julio del 2020; “Relevar y sistematizar las percepciones de los usuarios del Parque Batlle en horario nocturno, poniendo especial atención entre quienes concurren a realizar deportes y ejercicios.” [6]

En su gran mayoría los encuestados evalúan positivamente el estado del parque y expresan que este ha mejorado en el último año. La percepción de estas mejoras es mayor para los encuestados y los visitantes regulares. Más del 60% de los visitantes consideran que el estado del parque ha mejorado en el último año. En cuanto a la evaluación de los aspectos específicos del parque, se destaca la evaluación positiva de todos los aspectos evaluados, el mejor evaluado es el vinculado a las facilidades para hacer ejercicio, no constatándose grandes diferencias por zona. El 60% de los visitantes evalúa positivamente el estado de la iluminación con respecto a un

año, el 6% dice que está peor. El 55 % dice sentirse más seguro y el 2% de los encuestados dice que no le genera la sensación de bienestar.



## 7. Biografías

**Arq. Valeria Acosta.** (01/06/1979) Titulo obtenido en la Universidad de la República. Actividad Profesional. Trabajó en Descentralización; en el Departamento de Planificación Territorial y desde 2015 diseñadora de iluminación en la Unidad Técnica de Alumbrado Público.

**Arq. Andrés Souto.** (29/04/1961) Titulo obtenido en la Universidad de la República. Actividad Profesional. Desde 1996 diseñador de iluminación en la Unidad Técnica de Alumbrado Público. Desde 2003 Director de Obra de la Unidad Técnica de Alumbrado Público.

**Ing. Pablo Chavarría** (23/12/1963) Ingeniero Eléctrico. Titulo obtenido en la Universidad de la República. Actividad Profesional. Desde 1996 responsable de la Unidad Técnica de Alumbrado Público. Desde 2003 Gerente de la Unidad Técnica de Alumbrado Público.

## 5. Conclusiones

Es importante repensar el espacio en la noche y descubrir su identidad buscando en forma participativa un concepto que aborde distintas perspectivas, cómo las de género, de accesibilidad, sociales, económicas, culturales, deportivas e históricas. El concepto se lee con luz y se potencia con la incorporación de tecnología.

## 6. Referencias

- [1] Convenio con FADU Resolución Intendencia de Montevideo 2076/19
- [2] Kevin Linch (1960) La imagen de la Ciudad. GG 2015 (3<sup>a</sup> edición, 2<sup>a</sup> tirada).
- [3] Master Plan de Iluminación para el Parque Batlle. Arq. J.C. Fabra. Año Nov.2017
- [4] Percepciones y Uso del Parque Batlle. Equipos Consultores Set. 2018
- [5] Aplicación Móvil para Parques. Especificación de Requerimientos. Arnaldo C. Castro S.A. Versión 1.0
- [6] Iluminación Parque Batlle. Estudio Nocturno Equipos Consultores Jul. 2020

# Recuperando espacios a través de la luz. Restauración lumínica del Eje Ambiental de Bogotá

<sup>1</sup>Camila Andrea Robles Guauque

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia

<sup>a</sup> [croblesg@unal.edu.co](mailto:croblesg@unal.edu.co).

**Resumen**— Este proyecto académico explora el uso de técnicas del diseño de iluminación urbana, de forma que se genere una relación entre el espacio y sus usuarios, buscando invitar y recuperar su uso en horas nocturnas haciendo énfasis en la narrativa propia de este espacio público a través de la iluminación. Para ello se escogió como objeto de estudio un espacio público reconocido, patrimonial y de gran importancia histórica para la ciudad de Bogotá; El Eje Ambiental, una zona urbanística con una representación alegórica del río “Vicachá” cuyo significado es “el resplandor de la noche”. Un espacio actualmente percibido por sus transeúntes y visitantes como un lugar peligroso y sucio, por consiguiente, prefieren evitarlo.

**Palabras clave.** *Diseño de Iluminación exterior y urbana, Percepción de luz y color, factor humano, Iluminación en las ciudades.*

**Abstract**— This academic project explores the use of urban lighting design techniques, in such a way that a relationship is generated between the space and its users, seeking to invite and recover its use at night, emphasizing the narrative of this public space through the lighting. For this, a public space recognized, patrimonial and of great historical importance for the city of Bogotá was chosen as the object of study; El Eje Ambiental, an urban area with an allegorical representation of the river “Vicachá” whose meaning is “the glow of the night.” A space currently perceived by passers-by and visitors as a dangerous and dirty place, therefore, they prefer to avoid it.

**Key Words.** *Exterior and urban lighting design, Light and color perception, human factor, Lighting in cities.*

## 1. Introducción

La iluminación urbana juega un papel importante dentro de las ciudades. Su rol consiste en contribuir al desarrollo de las ciudades generando participación de sus habitantes y visitantes en horas de la noche. Si bien el sol y la luz día nos permite estar generando actividades de desarrollo durante en el día. En la noche se han generado otro tipo de actividades y labores que a su vez contribuyen con el desarrollo de las ciudades. Desarrollo que se ve relacionado de forma directa con el aumento de la población el cual se verá evidenciado mucho mas para el año 2050, según un estudio realizado por la Organización de Naciones Unidas (ONU). [1]

Actualmente en Colombia este tipo de iluminación se encuentra referenciada como Alumbrado público, un servicio de iluminación que tiene como fin dar visibilidad en espacios de libre circulación a vehículos y peatones [2]. Estas dos categorías de espacios cuya finalidad funcional es diferente una

de la otra, por lo que sus requerimientos técnicos y objetivos serán totalmente distintos uno del otro a pesar de que en ocasiones se encuentren tan cercanos uno del otro y deba considerarse una convivencia entre ellos.

El caso de estudio escogido, el Eje Ambiental, es una vía cuyo contexto base parte de un su participación en el recorrido del centro histórico de la ciudad de Bogotá. Una vía cuyo diseño envuelve los dos tipos de escenarios, el peatonal y vehicular en un mismo espacio, considerado patrimonio nacional por su trascendencia en el desarrollo histórico de la ciudad capital.

La investigación del contexto y del caso de estudio parte de una visita comparativa al sitio en horas del día con respecto a horas en la noche teniendo en cuenta la importancia histórica del lugar para sus ciudadanos, su relación con sus habitantes y el sector turístico de la ciudad y de cómo la iluminación sería una influencia de impacto para que este espacio contribuyera en el desarrollo de la ciudad nocturna.

Por lo tanto, se toma el diseño de iluminación en áreas urbanas como el caso de estudio, El eje Ambiental, como objeto principal de investigación definiéndolo como un factor que incidirá en como los usuarios finales del espacio se desenvolverán en este espacio y como esta actividad desencadena otros sucesos que contribuyen al desarrollo de la ciudad y mejore la calidad de vida de sus habitantes haciendo uso de metodologías de diseño como: el “Pensamiento de Diseño” y el “Diseño centrado en el ser humano”.

Estas metodologías permitieron poder visualizar y abordar el proyecto desde una visión general del contexto hacia lo específico y que requería más detalle en el proyecto, logrando proponer un diseño de iluminación que permitiera generar una relación entre el espacio y sus transeúntes, comunicando su historia a través de la luz, conviviendo con otro tipo de escenarios y factores que afectan directamente las actividades que allí se desempeñan, estudiándolos complementariamente a través de otras disciplinas que aportan mayor información y conocimiento respecto a la conducta del espacio y su entorno.

## 2. Metodología

El primer paso para llevar a cabo una propuesta de diseño de iluminación en el espacio urbano del caso de estudio, el Eje Ambiental, parte de un análisis del contexto de este espacio. Contexto que se analiza en los siguientes pasos:

### a. Contexto histórico

El eje ambiental fue construido en memoria del histórico río que allí fluía, cuyo nombre original, Vicachá, significa en el lenguaje nativo “el resplandor de la noche”. Un río que inicialmente suplió la agricultura, el acueducto, entre otras actividades con el agua que proveía, hasta que el abuso con sus aguas generó problemas de salubridad término canalizado.

### b. Arquitectura y Urbanismo.

El diseño arquitectónico urbano está compuesto por una zona peatonal y otra vehicular, ambas construidas en adoquín diferenciando a través del color un cambio de función. (**Fig. A**) [3] Una configuración de la zona peatonal que comunica una direccionalidad a través de unos espejos de agua ubicados en el medio indicando también un recorrido. (**Fig. A**) y una configuración de límites entre la zona peatonal y vehicular a través de árboles como el jazmín y falso pimiento dos especies que contribuyen a la conservación de zonas húmedas y recuperación del terreno erosionado y palmas de cera, típicas del país. (**Fig. B**)



Fig. A- Imagen Eje Ambiental.  
Tomada de Archdaily.co



Fig. B- Imagen Eje Ambiental.

### c. Ubicación y Entorno.

Este sector urbano se encuentra en el centro histórico de la ciudad de Bogotá, Colombia. Específicamente en la localidad de La Candelaria, un sector de los más visitados de la ciudad y

por su volumen de visitas la ciudad es considerada un destino turístico de talla mundial. [4] (**Fig. C**)

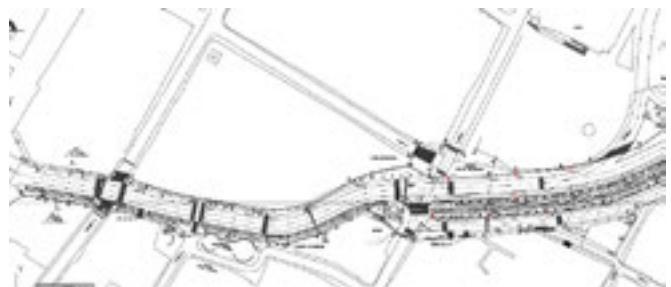


Fig. C – Plano de Planta del sector.

### d. Visitantes y habitantes

Además del turismo, el sector está rodeado por ambientes como: el comercio, entidades de educación, entidades gubernamentales, bibliotecas, museos, entre otros. Es decir que los habitantes y visitantes estarían relacionados con las actividades del entorno del sector.

### e. Percepción del espacio.

Se realizó una visita para evaluar cómo podría percibirse este espacio en horas de la noche. (**Fig D.**) Sin embargo, fue necesario y se quiso conocer la percepción de los transeúntes, teniendo en cuenta que son ellos los usuarios finales del espacio.

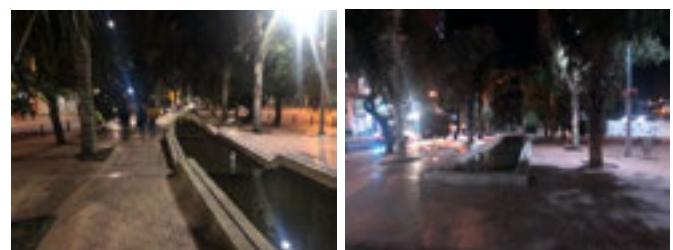


Fig. D- Imágenes Eje Ambiental en la noche.

Para ello se les realizaron encuestas que pudiesen dar información de cómo ellos percibían el espacio y todo aquello que despertaba en ellos con su respectiva razón. Estos análisis permitieron determinar y abrieron paso a una investigación más profunda donde se evidenciaron los siguientes resultados:

El 93.9% de las 163 personas encuestadas respondieron que conocían el Eje Ambiental, el 33.1% de ellos conocía la historia del lugar, el 89.4% de las personas encuestadas que no lo conocen presencialmente manifestaron interés por conocerlo. Lo cual indicó como primera instancia que había un déficit en el conocimiento histórico del lugar, pero la gente se encontraba interesada en conocerlo.

Adicionalmente, dentro del mismo estudio fue necesario recopilar información relacionada con el factor humano, donde eran los usuarios finales quienes daban un panorama de cómo se sentían estando en el espacio y como lo percibían en horas de la noche. En esta parte del estudio, el 74.8% le llamaba la atención su recorrido, al 47.9% de ellos les llamaba la atención el agua y al 36% le llamaba la atención la vegetación. Partiendo de los intereses del usuario de busca evaluar los enfoques en común que tienen como transeúntes del lugar y tenerlo en cuenta en la propuesta del diseño de iluminación.

Además de evaluar los aspectos positivos a realizar por medio de la iluminación, el 69.9% de los encuestados respondió que la percepción del sitio era de inseguridad, les daba miedo y desconfianza. Con este argumento se procedió a investigar más al respecto y se lograron encontrar estadísticas que confirmaban los que manifestaban los habitantes y visitantes de la zona.

Un estudio realizado por la alcaldía mayor de la ciudad de Bogotá del el “Boletín mensual de seguridad y convivencia” se logró evidenciar que, a comparación del año 2017, en el 2018 aumentaron los índices de criminalidad en la zona. [5] (Fig.1)

**Hurto a personas**

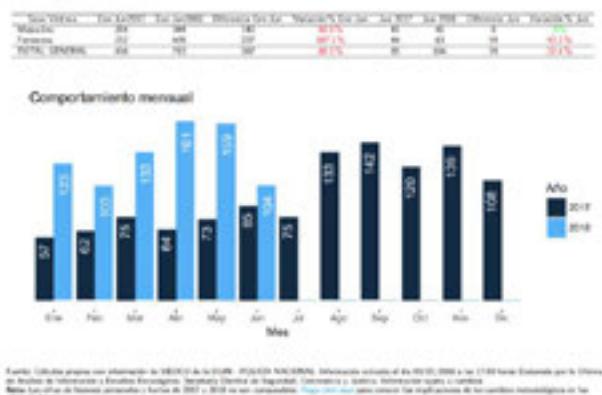


Fig. 1 – Gráfica de hurto a personas en La Candelaria de 2017-2018

Una parte del estudio que permitió determinar un factor determinante para el proyecto. Esto con el fin de como poder generar un impacto en este factor atendiendo a los otros requerimientos ya establecidos por la parte histórica.

Una vez realizado el análisis de estos usuarios finales, su comportamiento, las determinantes y requerimientos abstraídos de la información recopilada de las encuestas, se procede a realizar una comparación del estado actual y una propuesta tentativa de diseño para ver los pros y contras de haber alguno para llevar a cabo este tipo de proyectos.

## 2.1 Estudio Luminotécnico

diseño de esta vía fue llevado a cabo en Una vez se define la relevancia del espacio, se involucran en el estudio factores culturales, sociales, económicos y tecnológicos que a su vez tienen una relación directa e indirecta con el espacio. Para el análisis de estos factores se realiza una exploración y se hace uso de las metodologías de diseño del “*Design Thinking*” y del “*Human Centered Design*”. Esto con el fin de poder abarcar la mayor cantidad de información que permita establecer las determinantes y los requerimientos de un espacio según su uso y según su contexto de todo aquello que en él se desenvuelve.

Si bien el diseño de iluminación urbana va de la mano con el alumbrado público como foco puntual, donde este se ha definido como el servicio de iluminación que tiene como fin dar visibilidad en espacios de libre circulación a vehículos y peatones[1], es claro que en este tipo de alumbrado se desprenden dos categorías de usuarios y que a su vez tanto los usuarios finales como el espacio a intervenir está en medio de un contexto más global que hacen que haya o no una convivencia entre el espacio puntual, los usuarios y el espacio general, la ciudad.

Durante el análisis del espacio a intervenir lumínicamente, se detecta que actualmente en el contexto general de Colombia son muy pocos los espacios urbanos que van más allá de poseer una iluminación de tipo vial incluso en los espacios relevantes arquitectónicos donde su usuario final, los peatones, podrían tener mayor afinidad con el espacio mismo apreciándolo en su esplendor esencial en horas donde la luz natural pasa a ser remplazada por la luz artificial.

Por esta razón, el caso de estudio del Eje Ambiental, es escogido como caso particular en el cual no hay un usuario final único, dado que este espacio comparte una zona peatonal y una zona vehicular donde estas se interponen una en medio de la otra. Esta configuración nos lleva a una problemática adicional donde, así como hay dos tipos de usuario, de ello se desprenden dos tipos de escenarios que necesitan de unos requerimientos distintos y ambos deben convivir, por lo cual el diseño de iluminación tiene que estar fundamentado en la investigación, recolección de información y toma de decisiones basadas en los factores socioeconómicos expuestos anteriormente en conjunto con el contexto de espacio y ciudad.

se analiza la composición del espacio. Para ello se realiza un análisis del perfil vial, teniendo en cuenta que el espacio como tal lo compone una parte vial y una peatonal. (Ver Fig. 2)





Fig. 2. Análisis Gráfico del perfil vial y espacio peatonal.

El perfil vial está compuesto de una vía donde circula el medio de transporte público de la ciudad, es un carril doble sentido y cuenta con iluminación bilateral. Seguido por una zona peatonal que se compone de un recorrido de circulación y en el medio unas piletas de agua que generan una división demarcando el recorrido. Esta área se encuentra iluminada por los mismos postes viales que son doble propósito e iluminan las vías a su vez.

Las vías que componen este sector son consideradas vías principales desde que fueron construidas. Están clasificadas como vías de tipo M2, lo cual según RETILAP serían clasificadas como vías rápidas. (Ver Tabla 1)

Clase de iluminación	Descripción vía	Velocidad de circulación (km/h)	Tránsito de vehículos T (Veh/h)
M1	Autopistas y carreteras	Extra alta	V>60
<b>M2</b>	<b>Vías de acceso principal y sus rápidas</b>	<b>Alta</b>	<b>Media</b>
M3	Vías principales y ejes viales	Media	30<V<60
M4	Vías primarias o colectores	Reducida	V<30
M5	Vías secundarias	Muy reducida	Al paso

Tabla 510.1.1 a. Clases de iluminación para vías vehiculares.

Tabla 1 – Tabla 510.1.1 del RETILAP

Se respeta la clasificación de la vía a pesar de que por otros factores estas vías ya no manejan las velocidades correspondientes al tipo de vía M2 que allí se mencionan. La distribución de iluminación en el sector está dada de la forma (Ver Fig. 3):

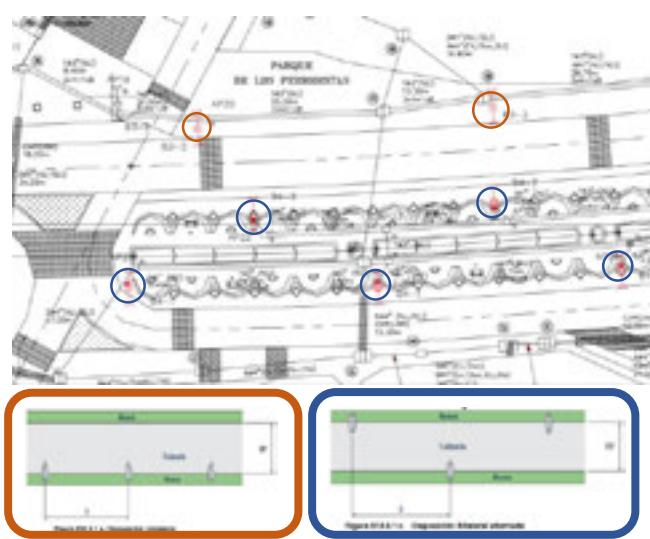


Fig. 3 Análisis de distribución de postes y puntos eléctricos del perfil vial y espacio peatonal.

El perfil vial actual está compuesto de dos tipos de distribuciones con el fin de tener una cobertura total en zonas de tránsito vehicular y zona peatonal. Una de las distribuciones, específicamente la que se encuentra demarcada de color rojo, corresponde a una distribución de iluminación vial unilateral y aquella que se encuentra en color azul, corresponde a una distribución bilateral alternada.

Habiendo determinado el tipo de vía y que su distribución se mantiene en el diseño actual de iluminación, Se define según el plano esquemático de los tipos de luminaria que fueron utilizados, las cuales fueron referencias misma familia de productos. La luminaria correspondiente al diseño de iluminación vial es una referencia “TECEO 2” de 229W con un flujo luminoso de 26,200 lm. Mientras que la referencia usada para las zonas peatonales es una referencia “TECEO 1” de 36W de potencia con un flujo luminoso de 4000 lm, ambas con una fotometría Asimétrica. Partiendo de esta información se definen unos parámetros de diseño determinados por la norma RETILAP, como se aprecia en el siguiente cuadro. (Ver Tabla 2) Parámetros que fueron aplicados a la propuesta final.

Tipo de vía	Cálculos vehiculares				Ciclistas adyacentes	Relación de aledañas		
	Espacio km² área/ área <sup>2</sup>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>		E <sub>km²</sub> luxes	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>
<b>CLASE DE ILUMINACIÓN</b>								
M1	2,0	40	50	10	20	40	10	35
<b>M2</b>	<b>1,0</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>35</b>
M3	1,2	40	50	10	10	40	8	32
M4	0,8	40	N.R.	10	10	40	6	33
M5	0,5	40	N.R.	10	7,5	40	5	33

Tabla 510.3 a. Requerimientos mínimos de iluminación para vías con ciclorutas y aledañas adyacentes

Aceptado de norma CIE 115 y NORM COI SEDE

Tabla 2- Niveles de iluminación requeridos según la clasificación de la vía. Tomada del RETILAP. Pág. 123.

Tabla 510.3.a.

Teniendo en cuenta la tabla anterior se procedió a calcular el factor de mantenimiento con la formula descrita en reglamento

$$FM = Enc \times FE \times DLB \times Rx Fb$$

Tal y como lo expone la norma de RETILAP en el numeral 580.2.3 Pág. 194. Cuyo resultado fue de 0.9. Para este resultado se realizaron los cálculos en software, haciendo cumplimiento de todas las determinantes y requerimientos. Una vez realizado el cálculo para este caso que correspondería a lo que actualmente se encuentra en sitio, los resultados fueron los adecuados para un sentido de la vía y zona peatonal y un resultado de no cumplimiento de niveles como se aprecia en el reporte de tablas generado (Fig 4)

Teniendo en cuenta el no cumplimiento, Se procedió a tener en cuenta la evaluación de fotometrías para la nueva propuesta, utilizando los mismos parámetros de tipo de vía y técnicos en

el factor de mantenimiento de la que se encuentra actualmente en el lugar .

Fig. 4. Resultados de perfiles Actuales.

Evidenciando también que en las áreas peatonales los arboles generan sombras aleatorias y zonas de penumbra que son las que podrían estar transmitiendo esa sensación de inseguridad. (Fig. 5)



Fig. 5. Resultados áreas peatonales.

Para la propuesta, fue necesario realizar un estudio fotométrico con el fin de generar una transición entre la iluminación vial y la iluminación de las áreas peatonales. Fig 6

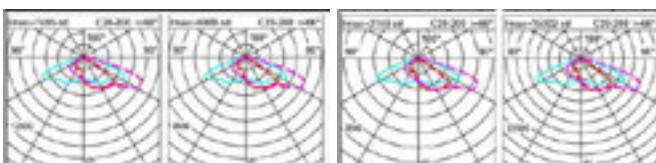


Fig. 6. Fotometrías de tipo vial.

Mientras que para el área peatonal se trabajó con proyectores de acentuación de tipo spot y accesorios de ópticas especiales como la elíptica para brindar una mayor uniformidad y a su vez generar un recorrido.

Realizando los cálculos en software, los valores y potencias utilizadas mejoraron considerablemente. Las potencias utilizadas iban desde 6W la de menor potencia hasta 176W la de mayor potencia. Y todo quedó con el cumplimiento requerido por norma según el tipo de vía. (Fig. 7)

Fig.7. Resultados de perfiles Propuestos.

En las zonas peatonales fue posible ver el cambio en la uniformidad como se muestra en la (Fig. 8) rectificando los niveles en la sección interna del recorrido.

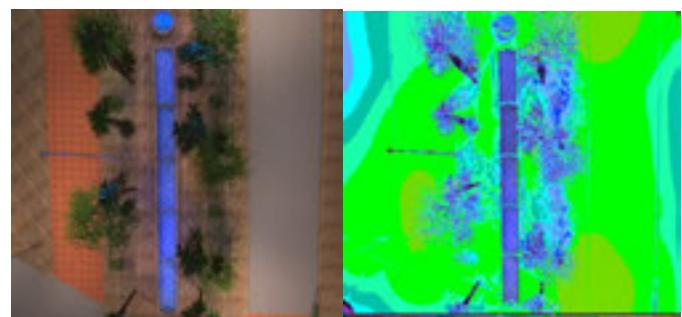


Fig 8. Experimentación de efectos

Además, con el fin de rescatar la historia se experimentó con el diseño de un accesorio que permitiese la proyección de causticas en el agua. Se encontró un proyector adecuado, más sin embargo por efectos de alcance se evaluó la posibilidad de generar el efecto a través de accesorios reflectivos que pudiesen proyectar el efecto deseado por medio de la experimentación. (Fig. 9) Teniendo en cuenta que este tipo de iluminación no era posible evaluar su efecto en software, se procedió a realizarse un modelo a escala de un sector del eje ambiental y realizar pruebas con materiales que permitiesen las proyecciones de las causticas deseadas.

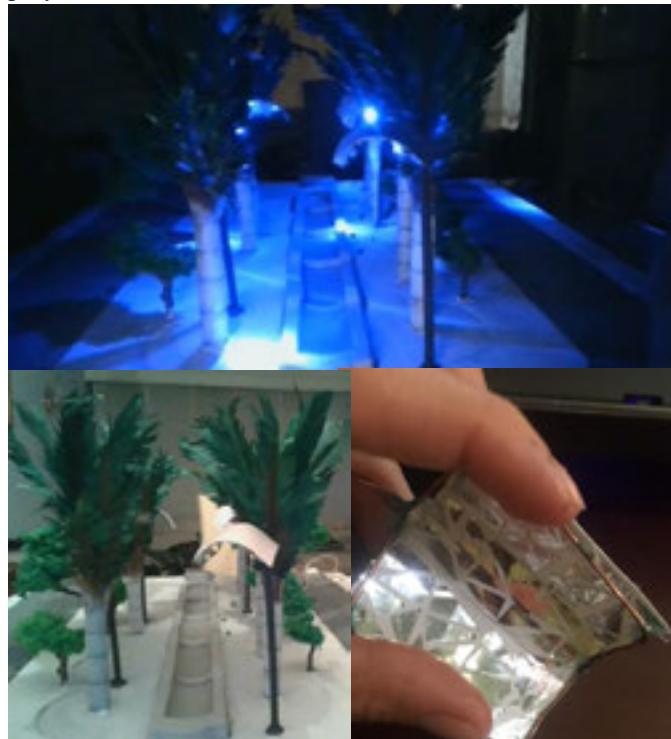


Fig.9. Experimentación de efectos.

### 3. Conclusiones

Los resultados para el proyecto fueron acertados, es posible generar la convivencia de dos tipos de iluminación tanto técnica como dinámica-artística que permita además de cumplir los niveles de iluminación y demás parámetros requeridos por la norma de RETILAP, conectar con sus usuarios, brindarles un espacio con un carácter diferenciador y un valor socio-cultural. La convivencia de los espacios viales y peatonales se dio de forma armónica teniendo en cuenta la temperatura de color y colores a utilizar.

El diseño de iluminación debe estar enfocado además de la actividad, en el usuario quien convivirá en el espacio. Para ello en un proyecto de diseño, en especial los proyectos

urbanísticos, que involucran el uso del espacio público, pues es allí donde tenemos la oportunidad de generar un impacto a nivel socio-cultural que permita incentivar y generar mayor desarrollo de la cultura en general y consigo la cultura de la luz.

La preocupación por cumplir con unos niveles puede alejarnos de tener esa visión de lo que verdaderamente prima y es el sentir del ser humano. Es posible diseñar para el sentir, aún teniendo en cuenta los requerimientos. Pero así mismo se debe hacer ver todo lo que hay detrás de esa intención e incluso hasta en que otras áreas o en que otras entidades podemos generar un impacto como diseñadores de iluminación que contribuyan no solo a el usuario final del espacio, si no al desarrollo de una ciudad como tal.

Se debe diseñar espacios urbanos con sentido, conciencia y analizando todo el sistema que envuelve este tipo de desarrollos y proyectos como los son: el factor humano, el Concepto, Experimentación para llevar a cabo alternativas de luz, generar experiencias, tener en cuenta la reglamentación y el factor económico, porque finalmente todos conforman el sistema y su evaluación permitirá la viabilidad del proyecto según su objetivo y valor agregado que se requiere según el espacio a diseñar.

### 4. Referencias

- [1] Arce Zapata, G. (2018, 30 mayo). DECRETO 943 DE 2018. Recuperado de: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=8668>
- [2] ONU Organización de Naciones Unidas. (2018, 16 mayo). Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Recuperado de: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-worldurbanization-prospects.html>
- [3] <https://www.archdaily.co/co/875283/10-parques-y-plazas-que-enmarcan-el-paisaje-urbano-y-la-naturaleza-en-colombia-595e7afcb22e38537c000178-10-parques-y-plazas-que-enmarcan-el-paisaje-urbano-y-la-naturaleza-en-colombia-foto>
- [4] Arango M, T. (2019, 22 abril). “La Candelaria es ahora un destino de talla mundial”, alcalde de La Candelaria. *La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co>
- [5] Doleac, J., & J Sanders, N. (2015, diciembre). Under the Cover of Darkness: How Ambient Light Influences Criminal Activity. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/286523047\\_Under\\_the\\_Cover\\_of\\_Darkness\\_How\\_Ambient\\_Light\\_Influences\\_Criminal\\_Activity](https://www.researchgate.net/publication/286523047_Under_the_Cover_of_Darkness_How_Ambient_Light_Influences_Criminal_Activity)
- [6] Under the Cover of Darkness: How Ambient Light Influences Criminal Activity. 2014 Jennifer L. Doleac, Nicholas J. Sanders 10.2139/ssrn.2603461SSRN Electronic Journal

# Aplicativo para el esquema de mantenimiento en instalaciones de iluminación interior y exterior

Angélica Vargas Chavarro<sup>1,a</sup>, Jesús M. Quintero<sup>1,b</sup>, Leonardo Bermeo<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia,

<sup>a</sup> [anvargasch@unal.edu.co](mailto:anvargasch@unal.edu.co), <sup>b</sup> [jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co), <sup>c</sup> [lbermeo@unal.edu.co](mailto:lbermeo@unal.edu.co)

**Resumen**— En el campo del diseño de iluminación el factor de mantenimiento (FM) es fundamental para garantizar los niveles de iluminación a lo largo de la vida del proyecto. El éxito de su cálculo está en conocer los parámetros técnicos de la fuente luminosa, así como las características ambientales de la instalación. El presente trabajo consistió en el desarrollo de un software basado en la especificación técnica ISO/CIE 22012, mediante el cual se genera el esquema de mantenimiento y la funcionalidad para ajustar el flujo luminoso de la lámpara con sistemas de control y mediante la predicción de la depreciación del flujo, permitiendo contar con niveles constantes de iluminación en el tiempo. Se realizó un análisis de los FM típicos utilizados en alumbrado público (AP) de algunos países de Latinoamérica y ciudades de Colombia, encontrando que la metodología que se ha utilizado en varias instalaciones no es la más adecuada para garantizar la calidad en niveles de iluminación durante la vida útil del sistema de AP.

**Palabras clave.** Factor de mantenimiento, depreciación, diseño, iluminación, CIE 22012, software.

**Abstract.** - In the field of design of lighting system, the maintenance factor (FM) is essential to guarantee the levels of lighting during the lifetime of the project. The computation of the maintenance factor depends on determining the technical parameters of the light source, as well as the surrounding environmental factors. This work presents the development a software based on the technical specification ISO / CIE 22012. This tool generates the maintenance scheme and automatically sets the luminous flux of the light source, according to the predicted depreciation of the flux. In consequence, it keeps a constant level of lightings over the time. In this regard, we carry out an analysis of the typical FMs used in public lighting (AP) in some Latin American countries and municipalities in Colombia. As a result of this study, we find that the common methodology used in these cases does not provide the quality of lighting levels during the lifetime of the AP system.

**Key Words.** Maintenance factor, depreciation, lighting design, CIE 22012, software.

## 1. Introducción

El factor de mantenimiento en los sistemas de iluminación se determina a partir de las condiciones ambientales de la instalación, los tiempos de limpieza y reemplazo de las fuentes. De acuerdo con la depreciación de su flujo luminoso, se representa como un factor (entre 0 y 1) que multiplica directamente los niveles de iluminación entregados en los diseños. Esto debe garantizar que se cumplan los requisitos de calidad y cantidad de luz del sistema alumbrado. Asimismo, constituye un insumo del análisis financiero.

La dificultad de su cálculo radica en que -hasta el 2019- la normatividad aplicable se encontraba dirigida a fuentes luminosas de tecnologías de sodio, fluorescente, incandescente entre otras. Para luminarias con fuentes de luz LED no se tenía

una información completa. Esta carencia de información ha llevado a una interpretación errónea y mal aplicada del uso de este parámetro, interpretándolo algunas veces como un sobre dimensionamiento innecesario.

El aplicativo desarrollado permite la selección de una forma didáctica de cada uno de los componentes del esquema de mantenimiento, dando al usuario las herramientas técnicas necesarias para el inicio de sus diseños fotométricos. Asimismo, suministra los lineamientos de períodos de limpieza y cambio de luminarias, para los administradores y/o propietarios del sistema de iluminación. En consecuencia, este factor tiene un alto impacto en la evaluación de costos del proyecto.

## 2. Descripción del método

El factor de mantenimiento se determina bajo la siguiente ecuación [1]:

$$f_m = f_{LF} \cdot f_s \cdot f_{LM} \cdot f_{SM} \quad (1)$$

Donde:

$f_{LF}$ : Factor de depreciación del flujo luminoso de la fuente.

$f_s$ : Factor de supervivencia.

$f_{LM}$ : Factor de mantenimiento de la luminaria.

$f_{SM}$ : Factor de mantenimiento del local.

Cada uno de estos factores obedece a características propias de las luminarias y de las condiciones de instalación y se describen a continuación:

### A. Factor de depreciación del flujo luminoso de la fuente.

Este factor representa la depreciación del flujo luminoso de cada luminaria en función del tiempo de operación, en luminarias de tecnología LED y el método de estimación que se presenta en la TM-21-11[2]. Las hojas técnicas de las luminarias presentan este valor en función del porcentaje de flujo luminoso en la vida útil media expresada en horas. Por ejemplo, lo podemos encontrar como L80 50000, lo que significa que, a las 50.000 horas de operación de la fuente luminosa, el flujo se encontrará al 80% de su flujo inicial.

A partir de este factor se determinan los tiempos de reemplazo de las fuentes luminosas, por ejemplo, en una instalación que opera 12 horas diarias y la especificación técnica de la luminaria manifiesta que cuenta con un L80 50000 y los planes de mantenimiento de la instalación determinan que la luminaria se reemplazará a los 10 años, aproximadamente a las 45.000 horas de operación, el flujo luminoso de la fuente estará en 82% y representa un  $f_{LF} = 0.82$ . Si la determinación es remplazar la fuente al final de su vida media es decir a las 50.000 horas (11.4 años) el  $f_{LF} = 0.80$ , en ningún caso la luminaria deberá ser reemplazada después de la vida media que manifiesta la especificación técnica de la luminaria.

La misma instalación con cambio de luminarias cada 10 años y utilizando luminarias con vida útil media L90 50000 se tendría  $f_{LF} = 0.80$ , como se presenta en la figura 1.

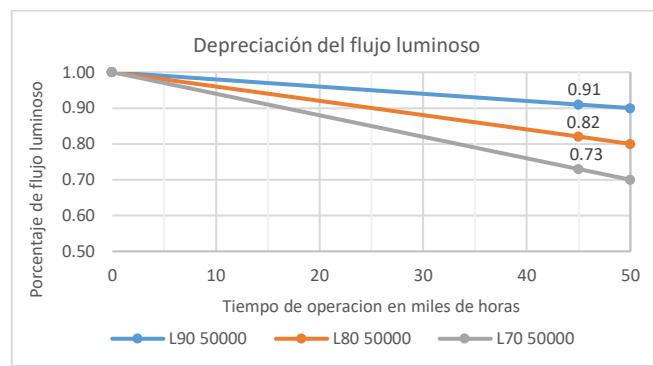


Fig 1. Grafica de depreciación del flujo luminoso en luminarias con vida útil media 50000 horas con L90, L80 y L70.

La misma instalación con cambio de luminarias cada 15 años (aproximadamente 65.000 de operación) y utilizando luminarias con vida útil media L70 70000 se tendría  $f_{LF} = 0.72$ , con luminarias L90 100000  $f_{LF} = 0.93$ , como se presenta en la figura 2.

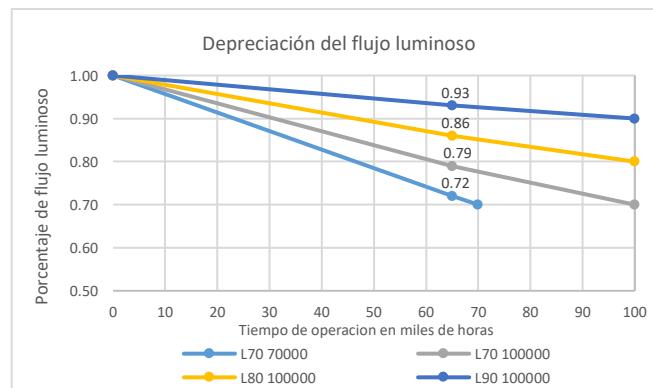


Fig 2. Grafica de depreciación del flujo luminoso en luminarias con vida útil media 70000 y 10000 horas con L90, L80 y L70.

## B. Factor de supervivencia

Este factor representa la probabilidad de falla de la luminaria, expresado en función de la continuidad del sistema y reemplazo de la fuente tan pronto falla. Si la fuente es reemplazada inmediatamente se detecta el fallo por una fuente de las mismas características  $f_{LF} = 1$ .

## C. Factor de mantenimiento de la luminaria

Este factor determina los períodos de limpieza de las luminarias. En instalaciones exteriores, se define de acuerdo con los niveles de polución de la instalación e índice de protección IPXX (protección de acceso a elementos sólidos y fluidos) del conjunto óptico de la luminaria, por ejemplo, dada una instalación de alumbrado con luminarias IP6X, en una zona de baja contaminación con períodos de limpieza de un año se tendría  $f_{LM} = 0.93$ , tal como se presenta en la figura 3.

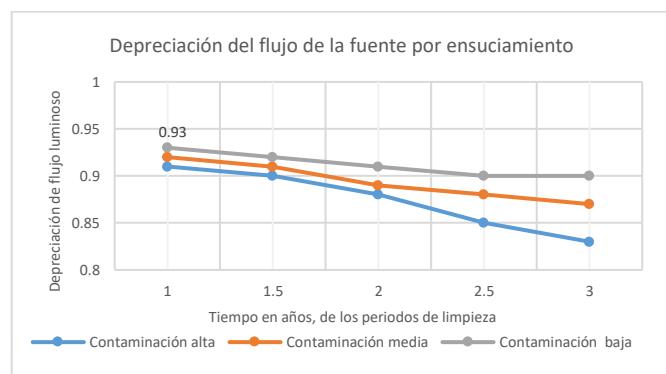


Fig 3. Grafica de depreciación del flujo luminoso en instalaciones exteriores por ensuciamiento en luminarias IP6X de acuerdo con los períodos de limpieza.

En instalaciones interiores, se define de acuerdo con el tipo de luminaria y las condiciones ambientales de la instalación, por ejemplo, en una oficina de ambiente limpio, con luminarias de carcasa superior cerrada, índice de protección IP2X y limpieza del conjunto óptico cada 2 años, tendría  $f_{LM} = 0.83$ , tal como se presenta en la figura 4.

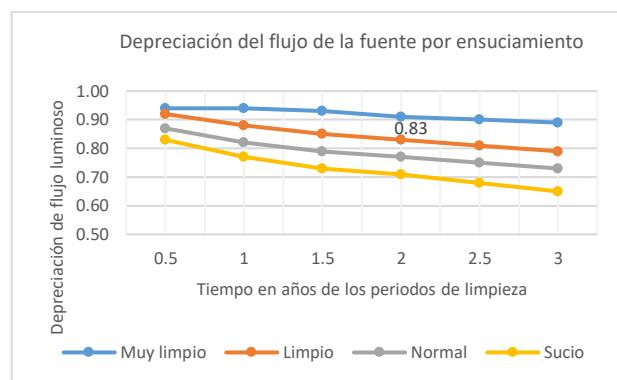


Fig 4. Grafica de depreciación del flujo luminoso en instalaciones interiores por ensuciamiento en luminarias IP2X de acuerdo con los períodos de limpieza.

#### D. Factor de mantenimiento del local.

Este factor se aplica únicamente en instalaciones de iluminación interiores y determina los períodos de mantenimiento de las superficies reflectivas de la instalación como techo, paredes y piso, se define de acuerdo con el tipo de luminaria, las características de distribución del flujo luminoso (directo, indirecto/directo, indirecto) y las condiciones ambientales de la instalación. Por ejemplo, para una instalación interior con ambiente muy limpio, con reflectancia de techo 0.8, paredes 0.7 y piso 0.2, con luminarias con distribución de flujo luminoso directo y manteniendo de las superficies reflectivas cada año, tendría  $f_{LM} = 0.96$ , tal como se presenta en la figura 5.

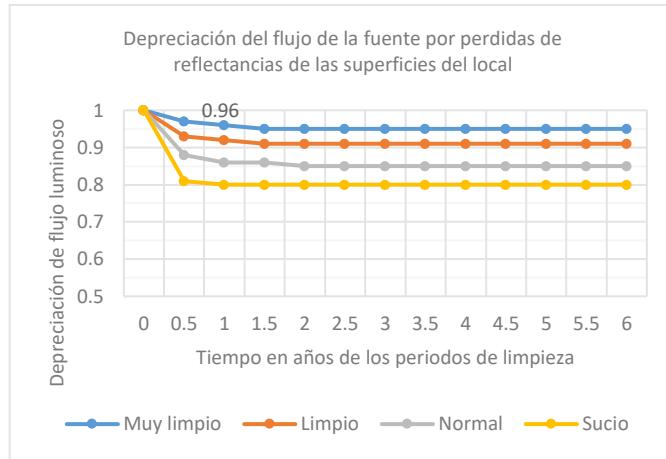


Fig 4. Gráfica de depreciación del flujo luminoso en instalaciones interiores por ensuciamiento en luminarias IP2X de acuerdo con los períodos de limpieza.

### 3. Esquema de mantenimiento

Con la definición de los parámetros de mantenimiento de la instalación de alumbrado, se procede a generar el esquema de mantenimiento de la instalación, donde se presentan los tiempos de limpieza de las luminarias y local, así como, los tiempos de cambio de las luminarias. Resultando una gráfica que presenta la depreciación del flujo luminoso en el tiempo del sistema de iluminación, asociado a todos los factores anteriormente descritos.

La figura 5, presenta un esquema de mantenimiento típico, se tiene la variable  $f_m$  en el tiempo, como el resultado de la ecuación 1, con variación de los niveles de iluminación a lo largo de la vida útil del sistema, garantizando que se dará cumplimiento a los niveles fotométricos de diseño y que después de cada periodo de mantenimiento de luminaria y local se tendrán niveles de iluminación superiores a los exigidos, dado que la potencia de la luminaria se mantiene constante en el tiempo.

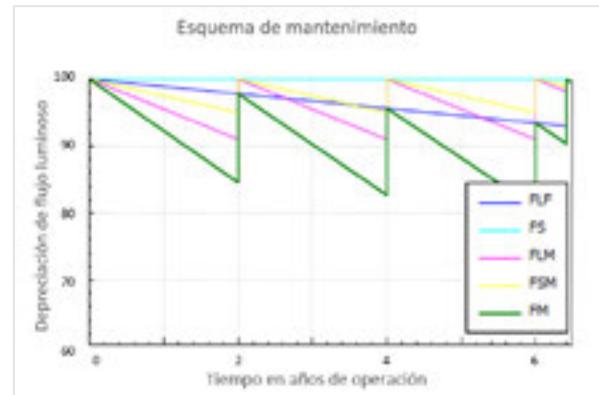


Fig 5. Grafica del esquema de mantenimiento de una instalación de alumbrado interior.

### 4. Esquema de niveles de iluminación constantes – CLO

Con la implantación de sistemas de control de iluminación y dado el acelerado desarrollo tecnológico que se está viviendo en el campo de iluminación, el futuro de los sistemas de iluminación debe dirigirse a generar esquemas de variación de la potencia de las fuentes luminosas asociadas a las predicciones de depreciación del flujo luminoso dado al esquema de mantenimiento.

Con la implementación de esquemas de mantenimiento con niveles de iluminación constantes CLO por sus siglas en inglés “Constant light output”, se promueve el uso eficiente y racional de energía, como se representa en la figura 6.

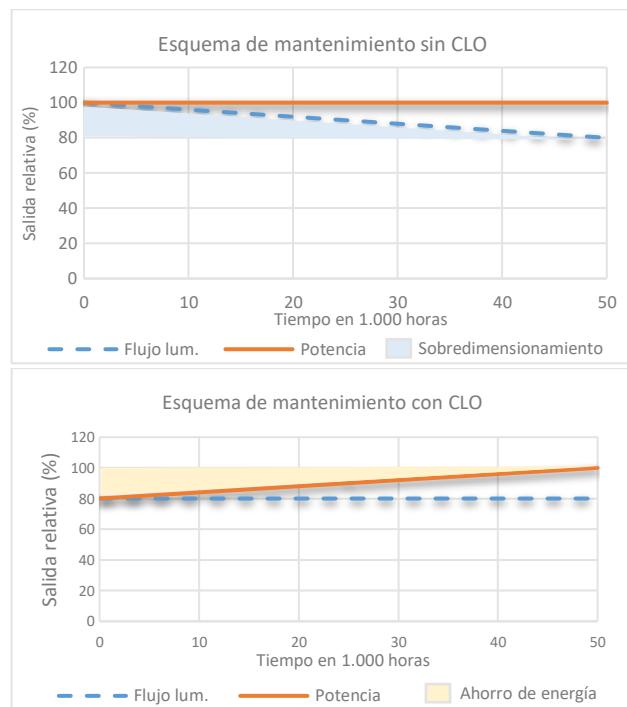


Fig 6. Esquemas de mantenimiento sin y con implementación de sistemas de control que mantengan los niveles de iluminación constantes en el tiempo.

## 6. Aplicativo para el esquema de mantenimiento

Con el uso de la plataforma de desarrollo de software QT-Creator, de código abierto, con programación en C++, se creó un aplicativo que permite ingresar de forma dinámica cada uno y todos los parámetros para determinar el esquema de mantenimiento en instalaciones de iluminación interior y exterior, incluye un glosario de términos que presentan la definición de cada uno de los factores del factor de mantenimiento.

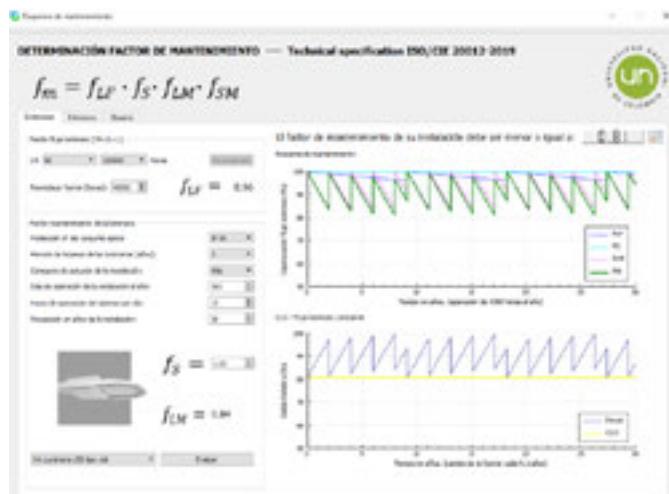


Fig 7. Aplicativo desarrollado para la generación de esquemas de mantenimiento.

Como resultado el aplicativo entregará un reporte en formato PDF, que incluye los esquemas de mantenimiento sin y con niveles de iluminación constantes, así como los períodos asociados a mantenimientos de luminarias y/o local, según las especificaciones suministradas por el usuario del tipo de luminaria y condiciones ambientales de la instalación.

## 7. Análisis de los resultados

A continuación, se realiza una comparación de los factores de mantenimiento a ser aplicados a un sistema de iluminación exterior tipo y un interior.

### A. Factor de mantenimiento en instalación de alumbrado vial.

Tomando como referencia el “*Global Standard GSCL005 – ENEL – Luminarias LED para alumbrado público*”[3], donde se establecen factores de mantenimiento para los diseños fotométricos de tres países de Latinoamérica, definiendo:

- Argentina,  $f_m = 0.7$ .
- Perú,  $f_m = 0.8$ .
- Colombia,  $f_m = 0.91$ .

Así mismo, se realizó la consulta en varios municipios de Colombia encontrando que se establecen factores de mantenimiento estándar independiente de la zona de instalación y períodos de limpieza y/o reemplazo.

- Bogotá,  $f_m = 0.91$ .
- Bucaramanga,  $f_m = 0.9$ .
- Cali,  $f_m = 0.89$ .
- Medellín,  $f_m = 0.88$ . [4]

Con el uso de la aplicativo, se realizó el cálculo de los valores de factor de manteamiento recomendados para una instalación de alumbrado vial, con una luminaria L70 100000 horas, variando los períodos de limpieza de las luminarias en 1-3 años y con niveles de polución, alto medio y bajo, como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Factores de manteniendo para una instalación de alumbrado exterior con luminarias IP5X y L70 100000, variando los períodos de limpieza y cambio de las fuentes luminosas.

Limpieza en años	Nivel de polución	Reemplazo de la fuente luminosa (miles de horas)						
		5	15	25	35	45	55	65
1	Alto	0.89	0.86	0.83	<b>0.80</b>	0.77	0.75	0.72
	Medio	0.90	0.87	0.84	0.81	0.78	0.75	0.73
	Bajo	<b>0.91</b>	<b>0.88</b>	0.85	0.82	<b>0.79</b>	0.76	0.73
2	Alto	0.86	0.84	0.80	0.77	0.75	0.72	<b>0.70</b>
	Medio	0.87	0.85	0.81	0.78	0.76	0.73	<b>0.70</b>
	Bajo	0.89	0.86	0.83	<b>0.80</b>	0.77	0.75	0.72
3	Alto	0.81	0.79	0.76	0.73	0.71	0.68	0.66
	Medio	0.85	0.83	0.79	0.77	0.74	0.71	0.69
	Bajo	<b>0.88</b>	0.85	0.82	0.79	0.77	0.74	<b>0.71</b>

En el caso que el operador del servicio de alumbrado público que reporta un  $f_m$  de 0.91, para dar cumplimiento a los niveles de iluminación objeto de diseño, es necesario realizar limpieza del conjunto óptico de la luminaria por lo menos cada año, instalaciones en zonas de bajo nivel de contaminación y remplazar la fuente luminosa cada 1.1 años.

Pero, si en los planes de mantenimiento de la instalación de alumbrado, se proyectará realizar el cambio de las fuentes luminosas cada 15 años, utilizando luminarias L70 100000, el factor de mantenimiento debería estar en el rango de 0.63-0.72, de acuerdo con los planes de limpieza del conjunto óptico y nivel de polución de la instalación.

### B. Factor de mantenimiento en una instalación interior.

Tomando como referencia una instalación interior con un tiempo de operación de 8 horas día por 312 días año, con luminarias de las siguientes especificaciones:

- Vida media útil: L80 70000
- Distribución de flujo luminoso directo
- Grado de protección IP2X.

Condiciones del local:

- Reflectancias de techo 0.7
- Reflectancias de paredes 0.5
- Reflectancias de piso 0.2

Los valores de factor de mantenimiento a ser aplicados en el diseño fotométrico para la instalación, con períodos de limpieza y renovación de las superficies reflectivas cada 1 y 3 años, para diferentes ambientes de la instalación, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Factores de mantenimiento para una instalación de alumbrado interior con luminarias IP2X y L80 70000, variando los períodos de limpieza y cambio de las fuentes luminosas.

Limpieza en años	Ambiente de la instalación	Reemplazo de la fuente luminosa (miles de horas)			
		5	15	25	35
1	Muy limpio	0.89	0.87	<b>0.84</b>	0.81
	Limpio	0.82	0.79	0.77	0.74
	Normal	0.73	0.71	0.69	0.66
	Sucio	0.65	0.63	0.61	0.59
3	Muy limpio	0.85	0.82	0.79	0.77
	Limpio	0.73	0.71	0.68	0.66
	Normal	0.64	0.62	0.60	0.58
	Sucio	0.55	0.53	<b>0.51</b>	0.50

Si en la instalación del ejemplo, dentro del programa de mantenimiento y el análisis financiero, se proyectará el reemplazo de la fuente cada 10 años (25.000 horas), el factor de mantenimiento debería estar entre el rango de 0.51-0.84, dependiendo de los períodos de limpieza y las condiciones ambientales de la instalación.

### 3. Conclusiones

La implementación de un aplicativo para el cálculo del factor y esquema de mantenimiento contribuye a unificar los criterios asociados al cálculo de este, el cual se presenta en algunas ocasiones como un parámetro fijo o estándar, independiente de las condiciones de la instalación y mucho menos de las especificaciones técnicas de la luminaria, con lo que se incurre en errores que pueden generar deficiencia en la calidad del sistema de alumbrado en el tiempo.

En la implementación de la modernización del alumbrado público, teniendo en cuenta que los municipios incurren en grandes inversiones, es conveniente ligar el factor de mantenimiento al análisis financiero, desde el cual se definen los tiempos de mantenimientos y cambios de las fuentes

luminosas, con el objeto de garantizar un alumbrado público de calidad a lo largo de la vida útil del sistema.

Los sistemas de iluminación no solo deben ser objeto de cambio tecnológico por fuente lumínosa, es conveniente que se implementen sistemas de control que permitan variar la potencia de la luminaria y de esta forma con el esquema de mantenimiento definido, predecir la depreciación del flujo luminoso y mantener niveles de iluminación constantes, lo que no conlleva a la generación de espacios con niveles de iluminación acordes a las exigencias normativas, sino que también promueven políticas de uso racional y eficiente de energía.

### 4. Referencias

- [1] CIE 22012:2019, Light and Lighting – maintenance factor determination – way of working.
- [2] IES TM-21-11. Projecting Long Term Lumen Maintenance Of LED Light Sources.
- [3] N. Cammalleri, Global Standard - Luminarias LED para iluminación pública GSL0005 Rev.2, ENEL 2018.
- [4] E. Perilla, D. Gómez, J. Rivera. Manual de procedimientos de alumbrado público del municipio de Medellín. Municipio de Medellín, 2018

### 5. Biografías

Angélica Vargas Chavarro. Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Cundinamarca, Especialista en Iluminación y Magíster en Automatización de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en Control, Diseño de Iluminación y en Planeación de Sistemas de Alumbrado Público.

Jesús M. Quintero PhD. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista y Especialista en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Telemática de la Universidad de los Andes, Doctor en Ingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya. Experto en el área de Iluminación, Energías Renovables y en sistemas de Electrónica de Potencia. De igual manera, es experto en la caracterización de variables cuantitativas y cualitativas asociadas al funcionamiento de sistemas ópticos y de iluminación

Leonardo E. Bermeo PhD. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magíster en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Río de Janeiro. Experto en Sistemas de Automatización y Control para sistemas digitales y analógicos, así como en Tratamiento de Señales.

# Metodología de diseño de un sistema de iluminación integrador para centrales de urgencias hospitalarias

Ing. José Luis García Piraján<sup>1, a</sup>, Msc Ing. Fernando Augusto Herrera<sup>1, b</sup>, PhD Ing. Paula Acuña<sup>3, c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, Colombia

<sup>a</sup> [josgarciapi@unal.edu.co](mailto:josgarciapi@unal.edu.co), <sup>b</sup> [faherreral@unal.edu.co](mailto:faherreral@unal.edu.co), <sup>c</sup> [pcacunar@unal.edu.co](mailto:pcacunar@unal.edu.co)

**Resumen**—Este artículo presenta el desarrollo de una metodología de diseño de “iluminación integradora”, basado en un concepto holístico, integrando características visuales, emocionales y biológicas aplicada para una central de urgencias. Para el análisis desarrollado de esta propuesta metodológica de diseño, se evalúan dos escenarios hospitalarios: un consultorio y una estación de enfermería, como característica de aplicación, se implementa el uso del software de iluminación Dialux evo y los factores de conversión melanópicos proporcionado por el fabricante de las luminarias proyectadas, comparando con una alternativa de diseño fotométrico estándar para ambos escenarios. Así mismo, se presentan otros casos de diseño e implementación, desarrollados en edificaciones hospitalarias similares, donde se relacionan los sistemas de iluminación y los ciclos circadianos.

**Palabras clave.** Iluminación integradora, procesos biológicos, ciclos circadianos, efectos visuales, efectos no visuales.

**Abstract**— This article presents the development of an "integrative lighting" design methodology, based on a holistic concept, integrating visual, emotional and biological characteristics applied to an emergency department. For the developed analysis of this methodological design proposal, two hospital scenarios are evaluated: an office and a nursing station. As an application feature, the use of Dialux evo lighting software and the melanopic conversion factors provided by the manufacturer of the projected lights are implemented, comparing with a standard photometric design alternative for both scenarios. Likewise, other design and implementation cases are presented, developed in similar hospital buildings, where lighting systems and circadian cycles are related.

**Key Words.** Integrative lighting, biological processes, circadian cycles, visual effects, non-visual effects

## 1. Introducción

En las últimas décadas los sistemas de iluminación han evolucionado, hasta el punto que, además de garantizar la visibilidad, contribuyen a regular el bienestar y la salud a través de la adecuada estimulación de los fotorreceptores ubicados en ojo humano[1][2][3]. Las instalaciones hospitalarias constituyen un espacio propicio para la aplicación de sistemas de “iluminación integradores”. En el año 2019 después de varias posiciones científicas la comisión internacional de la iluminación CIE estableció como término oficial “iluminación integradora”[4], “para la iluminación que está destinada a integrar los efectos visuales y no visuales, produciendo efectos fisiológicos y psicológicos en humanos de acuerdo con la evidencia científica”.

En el marco de las investigaciones y las metodologías propuestas para sistemas de iluminación circadianos, se han establecido métricas que cuantifican la respuesta de los fotorreceptores del sistema no visual. Al momento existen tres métricas que evalúan el impacto de la iluminación en el

sistema biológico: el estímulo circadiano “CS” – definido por Underwriters Laboratories(UL)[5], la iluminancia melanópica equivalente de la luz día D65 – definido por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE)[6], y la iluminación melanópica equivalente – definida por el estándar WELL [7].

## 2. Marco teórico

A inicios de este milenio se descubrió que aproximadamente un porcentaje de las células ganglionares contienen un fotopigmento llamado “melanopsina”, este es fotosensible a longitudes de onda cercanas a frecuencias de 480 nm [3]. Ante este estímulo las señales que son producidas por los ipRGC<sup>1</sup> son enviadas al núcleo supraquiasmático, este actúa como central del ciclo circadiano estabilizando los períodos de sueño y vigilia [4]. Existen evidencias que los períodos de sueño y vigilia son responsables del mantenimiento de los ciclos fisiológicos, las respuestas emocionales, el desarrollo de patologías y el comportamiento sexual [5].

### A. Relación de los ciclos circadianos y la salud

El actual desarrollo económico e industrial ha confinado a gran parte de la población al trabajo en los espacios cerrados y con horarios labores nocturnos. La mala estimulación puede desencadenar cambios en los tiempos de metabolismo, algunos de los procesos fisiológicos que presentan variación ante el ciclo circadiano, se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Procesos fisiológicos relacionados al ciclo de vigilia y sueño estado normal.

Proceso fisiológico y comportamiento	Día	Noche
Temperatura corporal	Alto	Bajo
Hormona del crecimiento	Bajo	Alto
Producción de orina	Alto	Bajo
Flujo sanguíneo cerebral	Muy Bajo	Muy Alto
Presión sistólica	Bajo	Alto
Estado de alerta	Alto	Bajo
Estado de sueño	Bajo	Alto
Melatonina	Bajo	Alto
Cortisol	Alto	Bajo
Tirotropina	Bajo	Alto

Para el caso hospitalario se han realizado estudios que demuestran una mejor evolución ante patologías producidas, a

<sup>1</sup> IpRGC: células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles.

partir de la estimulación biológica y emocional[8]. A continuación se describen algunas de estas investigaciones:

- Evaluación de un sistema LED ajustable en la unidad de salud mental del Swedish Medical center en Seattle[9].

En las áreas comunes de esta unidad se incorporaron luminarias, con sistema de dimerización y cambio de CCT, con el objetivo de mejorar el ambiente para el personal y los pacientes.

Con la implementación se llegaron a las siguientes conclusiones: la estimación de la distribución de potencia espectral en el ojo no fue sencilla de estimar, esto con el fin de relacionar los efectos circadianos de la iluminación. Así mismo al lograr el objetivo de diseño combinando los efectos circadianos y otros efectos biológicos, se observó que el sistema requería iluminancias más altas que las recomendadas para el uso de tareas visuales, en consecuencia se aumentó el uso de la energía en las luminarias en un 19%[9].

- Evaluación de un sistema LED ajustable en un centro cuidado para el adulto mayor en Sacramento [10].

Este proyecto se implementó con el propósito de evaluar nuevas tecnologías, asociadas a la exploración de los efectos de la luz en la salud. Los espacios incluidos fueron: un corredor, una habitación para residentes, una estación de enfermería y la oficina administrativa.

Se llegaron a las siguientes conclusiones: la combinación espectral y la dimerización, brindo la oportunidad de estimular las ipRCG durante las horas del día. Lo anterior se evidencio en la reducción del comportamiento demencial en un 41 % y la disminución en la cantidad de medicamentos psicotrópicos en tres de los sujetos de prueba. La métrica utilizada relacionada con los efectos no visuales, fue el EML, tomando como referencia el estándar Well Building y la hoja de cálculo publicada por Lucas[11].

- Reducción en los tiempos de recuperación en post operatorio y el efecto secundario UCI<sup>2</sup>[8].

Se han desarrollado estudios donde se observa reducción en los tiempos de recuperación en pacientes con anomalías en el ciclo de sueño y vigilia, producto de trasplantes renales, pacientes con enfermedades hepáticas y pacientes con condiciones cerebrales[8].

## B. Sistema visual y no visual

<sup>2</sup> UCI: unidad de cuidado intensivo

Es indudable que los sistemas de iluminación pueden tener impactos positivos o negativos, ya que además de cumplir con niveles requeridos para distintas actividades, deben sumarse a los criterios de diseño, los efectos biológicos[12]. Los fotorreceptores responsables del sistema visual (conos y bastones), en su condición generalizada de adaptación producen tres estados convencionales de la visión que se observan en la Figura 1.

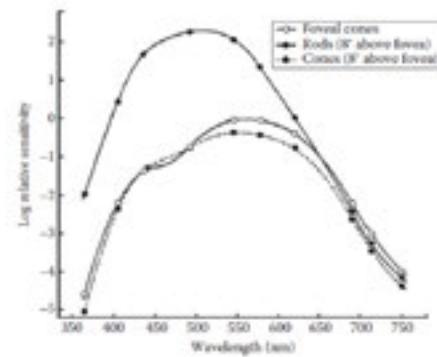


Figura 1. Estado de respuesta espectral relativa conos y bastones. Figura tomada de human factors in lighting. [3]

En relación con dos estudios de sensibilidad desarrollado en longitudes de onda cercanas a los 480 nm [3], la sensibilidad espectral de la melanopsina se observa en la Figura 2, resaltando el aporte de las longitudes de onda cercanas al azul y ultravioleta.

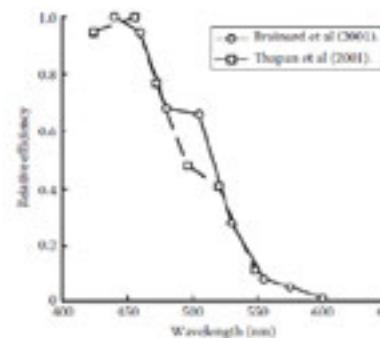


Figura 2. Estado de respuesta espectral estímulo electromagnético melanopsina. Figura tomada de human factors in lighting. [3]

Bajo la metodología del estándar biológico, como es el caso del WELL Building, la curva de la respuesta espectral de la melanopsina, se denomina curva melanópica asociada a la producción de la hormona melatonina<sup>3</sup> en el cuerpo humano [13]. Así mismo, se relaciona la producción de esta hormona al estado de alerta, del cual es responsable la concentración de la hormona cortisol [3].

<sup>3</sup> Melatonina: hormona producida por la glándula pineal asociada al sueño.

### C. Estándares de diseño para sistemas de iluminación circadianos.

Las diferentes comisiones de iluminación a nivel mundial han establecido dentro de sus criterios de diseño, los niveles y las características recomendadas que incluyen parametrización para los efectos biológicos de la luz[14]. En la Tabla 2 se listan los estándares y recomendaciones desarrolladas bajo la filosofía circadiana.

Tabla 2. Estándares de diseño y recomendaciones para sistemas de iluminación circadiana.

Estándar o recomendación de diseño	Año de publicación
DIN SPEC 5031-100	2009
DIN SPEC 67600	2013
DIN SPEC 5031-100	2015
WELL-STANDARD	2016
CIE S 026/E:2018	2018
UL RP24480	2019

Debe resaltarse de la Tabla 2, la implementación en edificaciones por parte del estándar WELL Building[7] y la recomendación establecida por UL RP 24880[5].

## 3. Metodología Integradora

### A. Tópicos integradores

La metodología se elaboró alrededor de tres tópicos, tomando como métrica de aplicación el “EML<sup>4</sup>”, para la evaluación de la iluminación circadiana en la central de urgencias. En la Figura 3 se observan las etapas de desarrollo de los tópicos integradores propuestos [15][1].

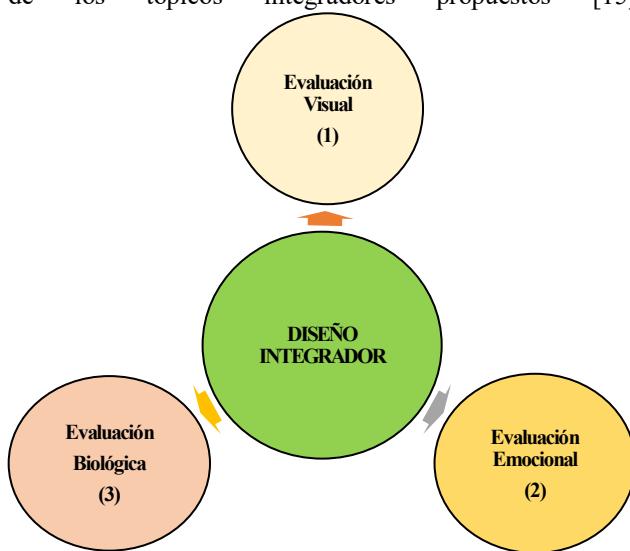


Figura 3. Metodología de diseño de iluminación integrador

A continuación se describen cada una de etapas:

**1. Evaluación visual:** se debe realizar una evaluación de las características fotométricas a obtener en el escenario. Para el caso de la central de urgencias se establece como referencia la práctica IESNA/ANSI RP 29 para instalaciones de cuidado de la salud [16].

**2. Evaluación emocional:** aunque los sentimientos y las emociones puedan ser características propias de cada individuo, se selecciona esta evaluación como una característica considerable desde la parte cualitativa, aplicable en la etapa de implementación del proyecto. Lo anterior puede disminuir los impactos generados por la instalación en las personas, esta evaluación emocional puede ser implementada con el desarrollo de componentes cualitativos y la aplicación de sistemas de control que permitan al usuario participar de la instalación ante sus expectativas[15].

**3. Evaluación Biológica:** Para la evaluación biológica se debe dar cumplimiento con los requisitos establecidos por el estándar WELL Building. El objetivo primario es alcanzar por lo menos la equivalencia de 200 lx melanópicos, medidos a una altura de 1,2 m simulando la vista del usuario. Para el desarrollo de la evaluación biológica se siguen las recomendaciones establecidas por Brenman [13], presentando un flujo de simulaciones como se observa en la Figura 6.

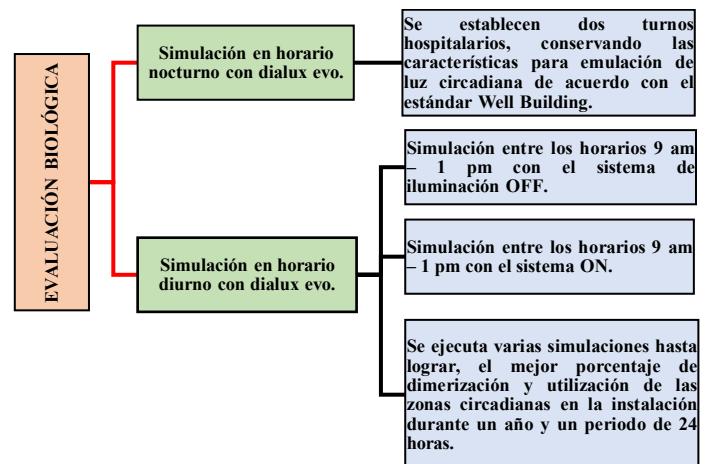


Figura 4. Flujograma evaluación biológica para edificación existente

Debe resaltarse que a diferencia de otros estudios[13], el esta metodología se desarrolla con el uso del software de iluminación Dialux Evo, evaluando durante un periodo de un año los aportes circadianos, en combinación con luz natural y la luz artificial (luminarias).

No se consideran en este análisis, los estímulos producidos por las pantallas de ordenadores[1], luego de obtener las iluminancias verticales promedio, se utiliza el método de la transformada de iluminancia, relacionada por un factor de equivalencia proporcionado por el fabricante de la fuente de

<sup>4</sup> EML: Equivalent melanopic lux.

luz[17]. La unidad EML se calcula de acuerdo con la siguiente relación matemática:

$$EML = Emed_v \times R$$

Donde,

$EML$  = lux melanópico equivalente. [1]

$Emed_v$  = lux fotopico vertical, medido a una altura de 1.2 m.

$R$  = factor de conversión, proporcionado por el fabricante de la fuente.

Este factor varía en consideración con la temperatura de color correlacionada, en la Tabla 3 se observan los factores de conversión “R” proporcionados para una luminaria la marca Zumtobel[18], resaltando los factores cercanos a 1 para CCT frías.

Tabla 3. Factores “R” en conformidad con la CCT para una luminaria de la marca Zumtobel [18]

CCT [K]	“R” Equivalente Melanópico”
2700	0,53
3000	0,61
3500	0,72
4000	0,80
4500	0,86
5000	0,92
5700	0,98
6500	1,05

Algunos factores de conversión “R” típicos establecidos por WELL para diferentes fuentes de luz, se observan en la Tabla 4[1]. Estos valores pueden ser de referencia para el desarrollo de ejercicios prácticos, con el uso de un software de diseño fotográfico.

Tabla 4. Factores de conversión R, típicos.

CCT [K]	Fuente de luz	R [EML]
4000	Fluorescente	0,58
4000	LED	0,76
5450	CIE E	1,00
6500	Fluorescente	1,02
6500	Luz dia	1,10
7500	Fluorescente	1,11

Además del factor “R” puede ser importante conocer la respuesta espectral, en la Figura 5 se observa la curva de respuesta de sensibilidad óptica de la función visual, en comparación con la curva de sensibilidad melanópica. Aunque para esta metodología no se tienen en cuenta estas curvas de respuesta, para otra implementación puede considerarse la especificación de la luz en términos de la irradiancia espectral y evaluar por separado para cada uno de los fotoreceptores[2].

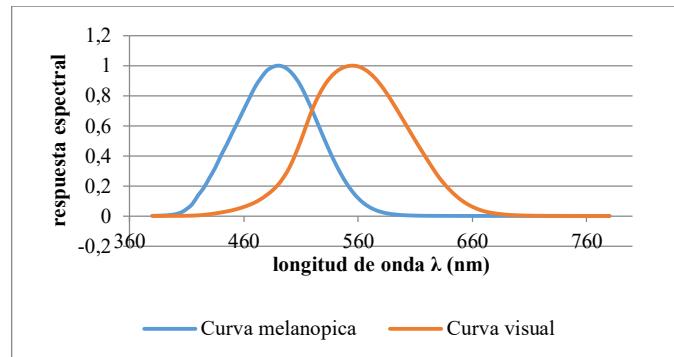


Figura 5. Curva de respuesta melanópica versus curva de respuesta fotópica (visual).

### 3. Ejemplos de aplicación de la metodología integradora.

Para la evaluación de la metodología se seleccionaron dos escenarios de una central urgencias hospitalarias[1], el primer escenario corresponde a un consultorio tipo y el segundo escenario a una estación de enfermería. Para la evaluación de estos escenarios, se desarrollaron dos alternativas de diseño, la primera alternativa acorde con una metodología de diseño de iluminación estándar (normativo ANSI/RP 29) y la segunda alternativa, aplicando la metodología de diseño “integradora”. En ambas alternativas se evalúa de manera particular el aspecto de confort visual, que corresponde a la cuantificación del fenómeno del contraste y el deslumbramiento. Esto resulta en un aspecto a considerar por las limitantes que puede llegar generar en el sistema visual humano, causando fatiga, discapacidad visual y efectos biológicos adversos[2]. Para realizar la evaluación del confort visual se toma como referencia, el índice de deslumbramiento unificado “UGR”, de acuerdo con el estándar EN 12464-2:2011[19] y lo exigido por el estándar WELL Building[7], en su capítulo de iluminación.

A continuación, se observa en Tabla 5 los resultados del estudio de la alternativa estándar y en la Tabla 6 se observa los resultados del estudio para la alternativa “integradora”.

Tabla 5. Resultados fotométricos alternativa de diseño 1 “estándar”

Escenario	Resultados fotométricos				Valores de referencia	
	Emed [lx]	Uo [min/med]	UGR	CCT [K]	UGR EN12464 WELL BUILDING	Emed [lx] IENSA RP29
Consultorio tipo	599	0,52	16,3	5000	19	500
Estación de enfermería	515	0,53	18,7	5000	19	500

Tabla 6. Resultados fotométricos alternativa de diseño 2 “integradora”

Escenario	Resultados fotométricos		Resultados melanópico		UGR	CCT [K]	Valores de referencia	
	Emed [lx]	Uo [min/med]	EML [lx]	Factor “R”			EN12464	Emed [lx]
Consultorio tipo	525	0,53	215	0,92	18,4	5000	19	500
Estación de enfermería	518	0,53	242	0,92	19	5000	19	500

En función de la equivalencia melanópica y de acuerdo con la metodología se analizaron los EML en un periodo de 24 horas.

#### A. Consultorio tipo.

Al aplicar la metodología integradora, se obtiene la gráfica EML resultante de la Figura 6, en consideración con los aportes artificiales (luminarias) y aportes de luz natural.

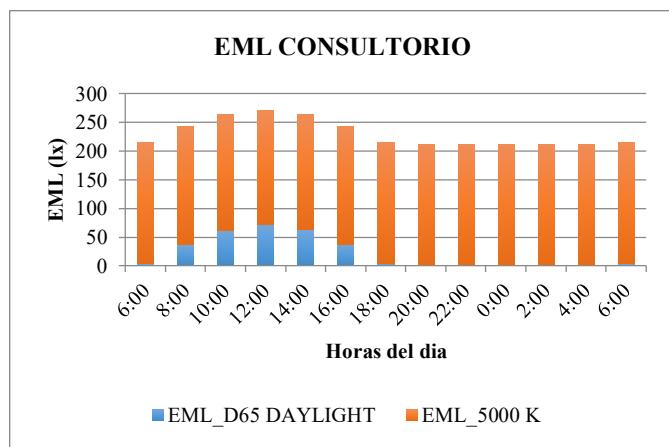


Figura 6. EML Consultorio evolución 24 horas del día.

Durante las 24 horas del día este escenario cumple con valores EML superiores a 200 lx, teniendo mayores aportes de la luz artificial. En cuanto al aporte de EML generado por la luz natural, se observa que, es inferior a los 100 lx EML y se debe principalmente a las características del ventanal existente evidenciado en la Figura 7. Bajo la identificación del diagrama de colores falsos, donde se detalla la zona de acceso de luz natural circadiana y el área de luz artificial circadiana.



Figura 7. Renderizado y diagrama de colores falsos zonas de aportes EML natural y artificial consultorio tipo.

#### B. Estación de enfermería.

Igual que el escenario anterior, se obtuvieron los EML resultantes de la Figura 8 para un periodo de evaluación de 24 horas.

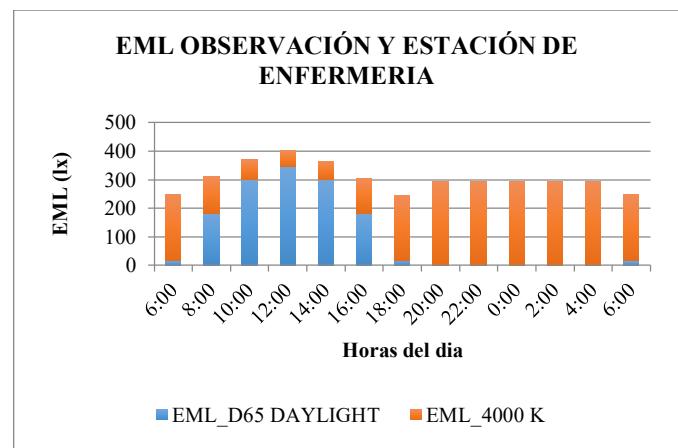


Figura 8. EML estación de enfermería evaluación 24 horas del día.

Se observa que se durante las 24 horas del día, la instalación cumple con los valores de EML superiores a 200 lx, con un mayor aporte de la luz natural entre la franja de 8 am a 4 pm. Lo anterior resulta significativo para el cumplimiento del estándar WELL, por lo menos en el criterio de la combinación de luz natural y luz artificial[7]. Resulta útil identificar las áreas de acceso luz natural circadiana y luz artificial circadiana, en la se detallan estas zonas.

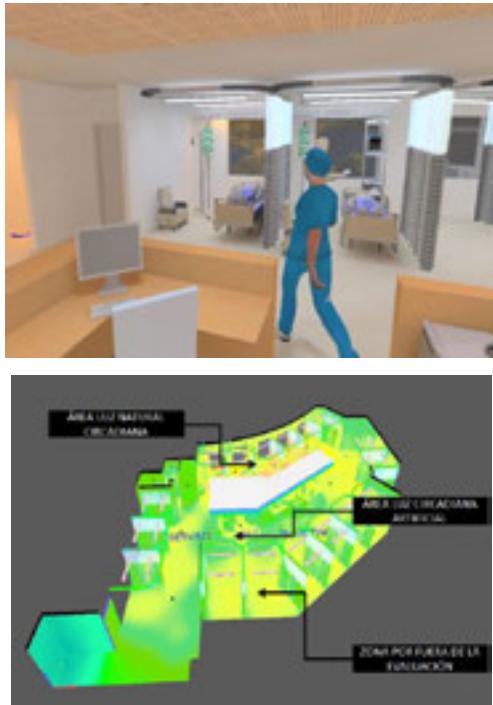


Figura 9. Renderizado y diagrama de colores falsos zonas de aportes EML natural y artificial estación de enfermería.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de este tipo metodologías es importante para la implementación de los futuros de sistemas de iluminación, que integren los efectos visuales y no visuales. A continuación, se describen las conclusiones y recomendaciones más relevantes.

##### A. Aspectos de diseño integradores.

Se desarrolla una metodología de diseño de iluminación “integrador”, en consideración con los criterios biológicos, establecidos por el estándar Well Building, para los dos casos de estudio seleccionados. Los criterios emocionales no se tomaron para este estudio, ya que en referencia con las aplicaciones e investigaciones recientes en el campo de la fisiología, es necesario integrar este aspecto en la etapa de implementación del proyecto[1].

En una futura implementación, sería importante realizar la medición de variables en campo, como se ha desarrollado con proyectos de este tipo, llevados hasta la etapa de implementación. Es importante resaltar que no existe un consenso a nivel mundial frente a los criterios emocionales, por ser un aspecto tan dinámico y personal.

##### B. Evaluación energética.

Para los escenarios seleccionados se evaluó la densidad de potencia LPD, evidenciando que, para la alternativa “integradora” se obtienen valores superiores de LDP de 12,9

$\text{W/m}^2$ , en conformidad con ASHRAE [20]. Así mismo y como segundo parámetro de evaluación energética, se determina el VEEI referenciado por el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público, que exige un máximo de  $3,5 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ , logrando un cumplimiento para los dos escenarios seleccionados.

Debe resaltarse el papel de la arquitectura de la edificación, ya que se pueden tener mayores aportes de luz natural, y en consecuencia lograr disminuir los índices de densidad de potencia lumínica artificial. Aunque la alternativa de diseño “integrador”, tenga unos valores de consumo energético superiores, obedece a una propuesta que puede mejorar la calidad de vida de los usuarios en la edificación.

##### C. Software de iluminación.

Esta metodología se desarrolló con el uso del software de iluminación Dialux evo y la aplicación de los factores de conversión EML, establecidos por el fabricante de las luminarias. Para futuros proyectos puede incluirse el uso de softwares de iluminación, que integren dentro de sus parámetros, indicadores de evaluación de los fotoreceptores no visuales. Con lo anterior se puede tener la posibilidad de incluir, los aportes de EML proveniente de otras fuentes, como son los monitores y las pantallas, que tienen incidencia en la estimulación de los fotoreceptores biológicos.

#### 4. Referencias

- [1] L. Garc, “Diseño de un sistema de iluminación integrador para una central de urgencias.,” pp. 1–61, 2020.
- [2] M. Rossi, *Circadian Lighting Design in the LED Era.*.
- [3] P. R. Boyce, *Human factors in lighting, third edition.* 2014.
- [4] CIE, “CIE statement on non-visual effects of light recommending proper light at the proper time,” *Light Eng.*, vol. 1, no. 2, 2019.
- [5] UL, “Underwriters Laboratories Inc design guideline DG 24480.” 2019.
- [6] CIE, “CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light,” *Int. Stand. CIE 026/E2018*, no. March, p. 32, 2018, doi: 10.25039/S026.2018.
- [7] WELL Standard, “Light | WELL Standard.” [Online]. Available: <https://standard.wellcertified.com/light>.
- [8] C. Blume, C. Garbazza, and M. Spitschan, “Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood,” *Somnologie*, vol. 23, no. 3, pp. 147–156, 2019, doi: 10.1007/s11818-019-00215-x.
- [9] A. Wilkerson, R. G. Davis, and E. Clark, “Tuning Hospital Lighting: Evaluating Tunable LED Lighting at the Swedish Hospital Behavioral Health Unit in Seattle,” no. August, p. 18, 2017, [Online]. Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/2017\\_gateway\\_swedish-tuning-led\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/2017_gateway_swedish-tuning-led_0.pdf).
- [10] R. G. Davis, A. M. Wilkerson, C. Samla, and D. Bisbee, “Tuning the light in senior care: Evaluating a trial LED lighting system at the ACC Care Center in Sacramento, CA,” no. August, 2016, [Online]. Available: [https://energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/2016\\_gateway-acc.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/2016_gateway-acc.pdf).

- [11] R. J. Lucas *et al.*, “Measuring and using light in the melanopsin age,” *Trends Neurosci.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004.
- [12] M. Braun, O. Stefani, A. Pross, M. Bues, and D. Spath, “Human factors in lighting,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5624 LNCS, pp. 223–230, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-02731-4\_26.
- [13] M. T. Brennan, A. R. Collins, and Z. G. F. A. Llp, “Outcome-Based Design for Circadian Lighting : An Integrated Approach to Simulation & Metrics,” *2018 Build. Perform. Anal. Conf. SimBuild co-organized by ASHRAE IBPSA-USA Chicago*, pp. 141–148, 2018, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/330716818\\_Outcome-Based\\_Design\\_for\\_Circadian\\_Lighting\\_An\\_Integrated\\_Approach\\_to\\_Simulation\\_Metrics](https://www.researchgate.net/publication/330716818_Outcome-Based_Design_for_Circadian_Lighting_An_Integrated_Approach_to_Simulation_Metrics).
- [14] Q. T. Vinh, P. Bodrogi, and T. Q. Khanh, “Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 11, p. 14538, 2018, doi: 10.1364/oe.26.014538.
- [15] H. C. Lighting, “licht.wissen 21.”
- [16] I. E. S. of N. America, “IESNA Lighting Handbook 10th Edition.”
- [17] H. Hagen, E., Richardson, “Circadian Daylight in Practice,” *Façade Tectonics 2016 World Congr.*, 2016, [Online]. Available: <https://www.atelerten.com/articles/circadian-daylight-in-practice/>.
- [18] ZUMTOBEL, “ECOOS II slim surface- ECOOS II ECOOS2 SLIM 5500-927-65 MSP L15 MPO LDE Pendant luminaire STD - standard,” 2020.
- [19] Comité Técnico-AEN/CTN-72, “Une 12464-1,” *Norma Eur. EN 12464-1*, p. 43, 2002.
- [20] M. C. A. Schwedler *et al.*, “ASHRAE STANDARD Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings,” vol. 2007, pp. 209–211, 2010.

#### 4. Biografías

José Luis García Piraján: Ingeniero electricista de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Especialista en iluminación pública y privada de la Universidad Nacional de Colombia y estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia. Se ha desempeñado como consultor de proyectos de alumbrado público, iluminación y eficiencia energética.

Fernando Augusto Herrera León: Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster y especialista en educación. Profesor Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como director de programa de Especialización en iluminación y coordinador del laboratorio de innovación en alta tensión y energías renovables, LIAT-ER.

Paula Catalina Acuña Roncancio: Ingeniera electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia y PhD en ciencias de la ingeniería. Se desempeña como docente de la Especialización en iluminación pública y privada, así mismo, es investigadora y diseñadora de ópticas en la compañía Delta Light.

# Diseño de iluminación interior de aeropuertos mediante el uso de luminarias arquitectónicas

Carlos Mendoza Aguilar Aguilar<sup>1,a</sup>, Angélica Vargas Chavarro<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia

cmendozaa@unal.edu.co , anvargasch@unal.edu.co

**Resumen**— Los terminales de transporte aéreo poseen grandes exigencias lumínicas a cumplir, en términos de iluminancia, UGR y uniformidad de acuerdo con el área de trabajo dentro de éstos; debido a esto las luminarias generalmente utilizadas para iluminar estos espacios son del tipo convencional, predominando las del tipo lineal, spotlights, downlights, etc; lo que genera en el espectador un ambiente muy “plano” y aburrido mientras hace uso de las instalaciones. Es posible lograr cumplir los valores exigidos por norma mediante el uso de luminarias arquitectónicas escogidas y distribuidas de acuerdo con un concepto establecido por el diseñador, esto con la finalidad de generar en los usuarios una experiencia única y entretenida.

**Palabras clave.** Iluminación, aeropuerto, arquitectónico, interior, diseño.

**Abstract**—Air transport terminals have high lighting requirements to meet, in terms of illuminance, UGR and uniformity according to the work area within them; Due to this, the luminaires generally used to illuminate these spaces are of the conventional type, predominantly those of the linear type, spotlights, downlights, etc; which generates in the viewer a very "flat" and boring environment while using the facilities. It is possible to achieve compliance with the values required by regulation through the use of architectural luminaires chosen and distributed according to a concept established by the designer, in order to generate a unique and entertaining experience for users.

**Key words:** Lighting, airport, architectural, interior, design.

## 1. Introducción

Las terminales aéreas representan para cada ciudad una de las edificaciones más importantes y relevantes para esta debido al flujo de personas que recibe y despide, así como por su arquitectura; al punto de ser uno de los principales temas de conversación de los turistas en sus viajes. Al ser diseñadas estas terminales el enfoque principal y más entendible es el asegurar la seguridad de sus usuarios, descuidando la experiencia que estos viven al estar dentro de las instalaciones, olvidando aspectos como lo son un diseño de iluminación innovador y fuera de lo común. Las terminales aéreas deben cumplir grandes exigencias en términos de iluminancia, UGR y uniformidad de acuerdo con el área de trabajo dentro de éstos, y es una de las principales razones por las que los diseñadores tienden a utilizar luminarias del tipo convencional, la arquitectura del edificio, generando un ambiente neutro, en ocasiones aburrido que puede ocasionar a los usuarios una experiencia estresante, sobre todo cuando se debe permanecer mucho tiempo en estar terminales en conexiones de vuelos. Es posible cambiar esto si se diseña un sistema de iluminación que utilice luminarias arquitectónicas, que se complementen con la estructura y arquitectura del edificio.

Otro aspecto relevante de los terminales aéreos son sus dimensiones y alturas, las cuales son en general de una gran magnitud (sobre pasando los 4 metros) y, si no se iluminan sus

techos se pueden generar un efecto caverna [1] que produciría un acentuamiento en el ambiente plano y aburrido mencionado anteriormente. Mediante el uso de luminarias RGBW LED para fachadas se pueden generar combinaciones de colores, efectos, y escenas dinámicas en el techo que puede crear una experiencia innovadora, diferente a lo usual.

Actualmente existen softwares de simulación permiten combinar estos dos elementos (diseños de iluminación arquitectónicos y escénicos) mediante la elaboración de modelos 3D muy similares a la realidad, permitiendo a su vez las creaciones de escenas de luz dinámicas; al utilizar estas herramientas para generar una terminal aérea podemos obtener el posible acabado del mismo, creando vistas y acabados que puede afectar la percepción típica del espectador, generando un aumento del número de visitas y por ende el aumento de ganancias económicas. En este artículo se desarrolló una guía de diseño, que servirá como base para el desarrollo de proyectos de iluminación interior (terminales aéreas en este caso) basándose en la experiencia previa de los autores.

## 2. Guía de desarrollo de proyectos de iluminación en terminales aéreas.

A continuación, se presenta un diagrama de flujos que resume el proceso recomendado a llevar a cabo para desarrollar con éxito este tipo de proyectos.



**Figura 1:** Diagrama de flujos de proceso de desarrollo de proyectos de iluminación de una terminal aérea.

Fuente: Autor

## A. Requerimientos lumínicos que deben cumplir las terminales aéreas

Antes de iniciar el desarrollo de un proyecto de iluminación interior es necesario saber que valores normativos de iluminación se deben cumplir. Las principales áreas comunes (aquellas a las que tienen acceso usuarios y trabajadores del terminal) que encontramos en un terminal aéreo son las siguientes: Salas de espera, baños, zonas de retiro de equipajes, zonas de registro, zonas de control de migraciones, zonas de comidas y puestos de información [2]. Para este apartado se omitirán las zonas comunes como baños y zonas de comida ya que los requisitos lumínicos dependerán de la normativa local de cada país, para el resto se enfoca en la norma UNE EN 12464 del 2012 [3], donde se establecen los siguientes valores:

Tabla 5.52 – Áreas de transporte – Aeropuertos

Nº ref.	Tipo de actividad, tareas y actividad	$E_{av}$ lx	$E_{GR}$ lx	$E_A$ lx	$E_B$ lx	Requerimientos específicos
5.52.1	Salas de llegada y salida, zonas de recogida de equipajes	200	22	0,40	80	
5.52.2	Áreas de controlistas	1.10	22	0,40	80	
5.52.3	Mesas de información, facturación	100	19	0,70	80	Trabajo con EPV, véase el apartado 4.9
5.52.4	Admisiones y mostradores de control de pasajeros	100	19	0,70	80	Tiene que proporcionar iluminación directa
5.52.5	Áreas de espera	200	22	0,40	80	
5.52.6	Salas de emergencia	200	25	0,40	80	
5.52.7	Áreas de control de seguridad	200	28	0,60	80	Trabajo con EPV, véase el apartado 4.9

Tabla 1: Valores luminotécnicos exigidos para

Fuente: Norma UNE EN 12464 del 2012

## B. Estructuración del proyecto

Este paso es de vital importancia ya que nos permite conocer y establecer características resaltantes del proyecto, tales como, su arquitectura, ubicación, áreas presentes, alturas, etc.; que nos permitan crear un concepto que pueda ser utilizado como inspiración para el desarrollo de nuestro proyecto. Como ejemplo estableceremos un Aeropuerto que se encuentra ubicado en un lugar selvático, con una variedad de fauna y clima lluvioso de Venezuela.

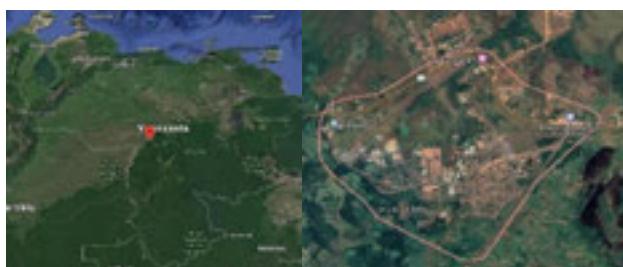


Figura 2: Ubicación del proyecto referencia

Fuente: Google Maps.

## C. Establecimiento del concepto a desarrollar

En este caso se debe tomar en cuenta las características principales encontradas a la hora de estructurar el proyecto, esto nos permitirá establecer un concepto de diseño a desarrollar, dándonos una idea del tipo de luminarias,

fotometrías, temperaturas de color, disposición etc. Dicho concepto integrará la iluminación del proyecto con el entorno del sitio, dándole una identidad muy propia [1]. En este caso, tomamos como inspiración la fauna del lugar (aves específicamente) para desarrollar el concepto y los referentes.

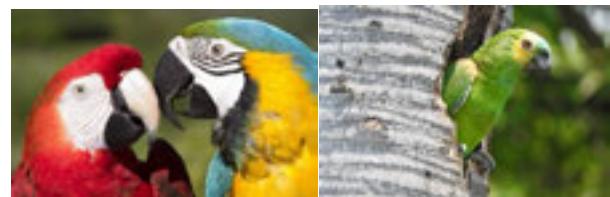


Figura 3: Base de inspiración para el desarrollo del concepto del proyecto referencia

Fuente: Google Images/aves.

## V. Luminarias para utilizar en el proyecto

Las áreas anteriormente mencionadas en terminales aéreas se encuentran generalmente en zonas abiertas, de un gran área y altura; ello representa un reto a la hora de cumplir los valores normativos mediante el uso de luminarias arquitectónicas, ya que estas generalmente son de baja potencia, con fotometrías que no son diseñadas para el tipo de trabajo llevado a cabo en un aeropuerto, generando en la mayoría de las ocasiones un deslumbramiento mayor al permitido en norma, siendo esta la principal problemática. Es por ello por lo que se recomienda utilizar lámparas que tengan una fotometría lo más cerrada posible [1]. En este proyecto se utilizaron luminarias que se asemejan en forma a las aves:

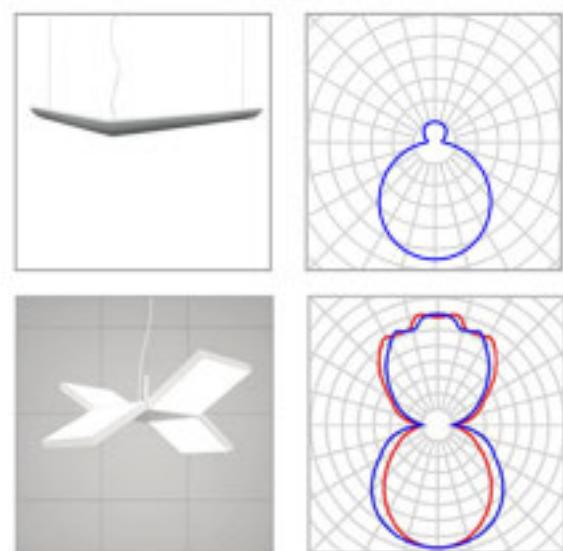
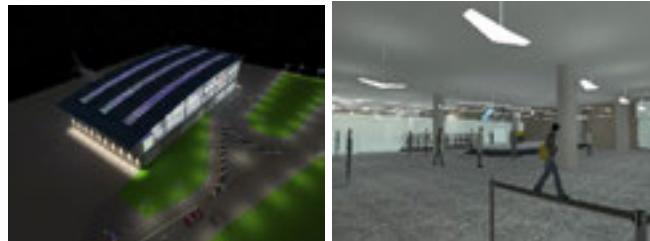


Figura 4: Modelo y diagrama polar de luminarias utilizadas en el proyecto referencia

Fuente: <https://www.artemide.com/en/home>.  
<https://www.ateljelyktan.se/>

#### D. Modelado del proyecto

Una vez establecidos los criterios anteriores se inicia a modelar en software de simulación la estructura del edificio, a diferenciar los distintos tipos de áreas presentes y a establecer las mallas de cálculo de estas. Para evitar reprocesos es ideal incluir toda la mueblería que presentaría el proyecto antes de iniciar simulaciones. El Software de simulación de iluminación más común en la actualidad el DIALux evo [4]. En este paso se ubican las luminarias de acuerdo con el concepto establecido anteriormente.



**Figura 5:** Resultados del modelado del proyecto referencia  
**Fuente:** Autor.

#### E. Simulación de resultados.

Una vez modelado el proyecto, incluidas las luminarias y establecidas las mallas de cálculo, se procede a obtener los resultados, haciendo ajustes tanto de ubicación, disposición, y cantidad de luminarias de acuerdo con los valores obtenidos, hasta conseguir cumplir los valores exigidos por las normas.

#### F. Simulación de escenas de luz dinámicas.

Un valor agregado que puede darse a los edificios de este tipo puede ser la incorporación de escenas de luz dinámicas, que ilumine y resalte los lugares más característicos de su arquitectura, generando un ambiente único y diferente al espectador. Anteriormente no existía un software que permitiera diseñar estas escenas de manera libre, sin el uso de software específicos de cada fabricante. Esto cambió gracias a la llegada del software llamado LightCAD [5] (el cual fue utilizado para este proyecto), este software, al igual que otros de diseños de iluminación como DiaLUX permite la importación de objetos 3D en diversos formatos, y simular escenas de luz dinámica en tiempo real. Para este proyecto se simularon escenas que reflejaban colores en el techo del recinto simulando banderas nacionales, colores de acuerdo con el clima del recinto entre otras.



**Figura 6:** Ejemplos de escenas dinámicas simuladas en el software LightCAD  
**Fuente:** Autor.

### 3. Conclusiones.

De acuerdo a la experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto se pudo ver con claridad que si es posible realizar diseños de iluminación fuera de lo común para áreas destinadas a ser usadas como terminales de transporte; mediante el uso de luminarias arquitectónicas y creando escenas de luces que mejoren la experiencia de los usuarios. Para ello es necesario tener muy claro 2 aspectos: el concepto que se quiera desarrollar y la arquitectura del lugar, ya que esto es lo que nos guiará hacia y nos dará las ideas a implementar a lo largo del proyecto. A continuación, se presenta un flujo que resume los pasos a seguir para llevar a cabo con éxito un proyecto de este tipo:

### 4. Referencias

- [1] Memorias clases especialización en Iluminación Pública y Privada - Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá - Octubre 2020, Semestre 2019-II..
- [2] Las Principales áreas de un aeropuerto - <https://blog.vise.com.mx/las-principales-areas-de-un-aeropuerto> EXPERIENCIAS PROPIAS.
- [3] Norma Española UNE-EN 112464-1. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores. Año 2012.
- [4] DiaLux evo - <https://www.dialux.com/en-GB/>
- [5] LightCAD - <https://lightcad.com/>

## **5. Biografías**

**Carlos Mendoza:** Especialista en Iluminación Pública y Privada de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre.

**Angélica Vargas:** Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Cundinamarca, Especialista en Iluminación y Magíster en Automatización de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en Control, Diseño de Iluminación y en Planeación de Sistemas de Alumbrado Público.

# Estrategias para el diseño de iluminación en escenarios deportivos

Diego Varón Peña <sup>1,a</sup>, Angélica Vargas Chavarro <sup>2,b</sup>, Mauricio Polanco <sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, <sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, <sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia

<sup>a</sup> [dvaronp@unal.edu.co](mailto:dvaronp@unal.edu.co), <sup>b</sup> [anvargasch@unal.edu.co](mailto:anvargasch@unal.edu.co), <sup>c</sup> [bmpg72@gmail.com](mailto:bmpg72@gmail.com)

**Resumen**—Se describen una serie de estrategias enfocadas en dar claridad en las diferentes etapas que comprenden el diseño de iluminación en escenarios deportivos. En muchas ocasiones al abordar este tipo de proyectos no se tiene certeza de cómo enfrentarlos, por lo que se expone una guía paso a paso para el desarrollo de estos proyectos. Las estrategias se van presentando en cada etapa de acuerdo con el desarrollo del diseño y cada una está enfocada en ayudar al diseñador a encontrar la solución de forma eficiente. Adicionalmente, se presentan recomendaciones de cómo realizar el diseño y qué parámetros definir para disminuir los reprocesos.

**Palabras clave.** *Diseño de iluminación, escenarios deportivos, estrategias de diseño, guía paso a paso.*

**Abstract**—A series of strategies focused on giving clarity in the different stages that comprise lighting design in sports venues is described. On many occasions when tackling this type of project, there is no certainty about how to deal with them, so a step-by-step guide is exposed for the development of these projects. The strategies are presented at each stage according to the development of the design and each one is focused on helping the designer to find the solution efficiently. In addition, recommendations are presented on how to carry out the design and what parameters to define to reduce rework.

**Key Words.** *Lighting design, sports venues, design strategies, step-by-step guide.*

## 1. Introducción

Las estrategias a plantear se irán presentando de acuerdo con el desarrollo de un diseño de iluminación. Se presenta un paso a paso de cómo desarrollar el diseño y se describen por etapas las estrategias para poder cumplir el objetivo en cada paso.

Como primera estrategia es preciso conocer la dinámica del deporte que se desarrollará en el escenario. Existen muchos escenarios en los que se pueden practicar varios deportes y cada uno tiene características particulares de iluminación, por lo tanto, el primer paso es conocer el deporte o los deportes a ser practicados en el escenario. La segunda estrategia es realizar una consulta de las recomendaciones y las normas de las asociaciones o federaciones que rigen el deporte, esto con el propósito de buscar requerimientos generales que debe cumplir el escenario deportivo, como son las dimensiones de la cancha, materiales y señalización.

## 2. Características del Escenario Deportivo

En esta etapa se contemplan las estrategias relacionadas con las características del escenario deportivo, por lo tanto, se debe tener definida la geometría del campo, verificar medidas, materiales (texturas), soportes estructurales, arquitectura, entre otros temas. Un punto a tener presente es la estética final y las adecuaciones futuras.

El primer paso consiste en verificar todas las medidas del escenario deportivo, por ejemplo, verificar que las medidas de la cancha se ajusten con las especificaciones dadas por la federación para juegos oficiales. Otras medidas a tener en cuenta son las distancias entre la cancha y las tribunas, altura del techo para escenarios en interior y ubicación de las cámaras de televisión. La estrategia consiste en verificar las medidas por medio de planos, fotografías (si el escenario es existente) o modelos 3D. Estos elementos son importantes y nos permiten visualizar el escenario para contemplar todos los detalles. Se recomienda revisar estos documentos ya que son los datos de entrada para las etapas posteriores del diseño.

El siguiente paso es delimitar el montaje de las luminarias, en este punto es importante especificar todo lo relacionado con este tema, ya que se describen los posibles obstáculos e inconvenientes los cuales evitaran reprocesos en el diseño. Para canchas en interior, se debe verificar el tipo de anclaje y las limitantes de peso y altura. Si el escenario es en exterior, se debe definir la altura mínima de montaje, el uso de mástiles o postes, o si se requiere algún tipo de estructura especial que se deba desarrollar. Cada escenario tiene sus limitantes y éstas deben quedar definidas en este punto para evitar inconvenientes con las demás especialidades. Como estrategia se deben consultar proyectos similares, o definirlos con el cliente, ya que depende mucho de otras especialidades.

El tercer paso es poder desarrollar un modelo en 3D del escenario deportivo, teniendo en cuenta las características descritas anteriormente, este modelo será de gran ayuda para visualizar el diseño de iluminación y sus resultados. La estrategia consiste en buscar modelos similares del escenario en las bibliotecas digitales, por ejemplo, la página 3D Warehouse tiene bastantes modelos 3D desarrollados en SketchUp, en esta página se encuentra gran variedad de escenarios, se descargan y se modifican de acuerdo a las características del escenario. Este modelo desarrollado debe tener las medidas y texturas del escenario real, con esto se asegura un diseño acorde al real.

Por último, es importante definir la ubicación de las cámaras de televisión. La estrategia en este paso es utilizar la ubicación dada por la administración del escenario, si no se tiene esta información se deberá seguir las recomendaciones de las normas de cada deporte y definir las ubicaciones. Otra estrategia es revisar la ubicación en escenarios similares, de esta manera se puede definir la ubicación típica y el número de cámaras usadas. Con esta información se define la altura y la

cantidad de cámaras, si el diseño de iluminación es una modernización se tiene en cuenta las ubicaciones actuales.

### 3. Requerimientos luminotécnicos

Los requerimientos luminotécnicos son los objetivos de iluminación que se deben cumplir para que los deportes se desarrollen de forma óptima, estos requerimientos son los que se deberán cumplir en las simulaciones.

Para esta etapa es necesario revisar las normas luminotécnicas asociadas a cada deporte. Si en el escenario se practican diferentes deportes es necesario establecer cuál tiene el nivel de iluminación más exigente, de esta manera se definen los objetivos a cumplir. Las normas internacionales son las bases para definir los valores objetivos, como primer documento se recomienda revisar The Lighting Handbook - Reference and Application, décima edición [1], este documento es un punto de inicio con una buena descripción de varios deportes y aplicaciones, en su capítulo 35 se presentan las tablas y recomendaciones para cada actividad deportiva. El segundo documento a consultar es la norma EN 12193 – Light and Lighting - Sports Lighting [2], las tablas y explicaciones son precisas para entender cómo realizar los diferentes cálculos. El tercer documento el cual tiene referencias de diferentes deportes son las normas de instalaciones deportivas y para el espaciamiento (NIDE) emitidas por el consejo superior de Deportes del gobierno Español [3], en estas se encuentran información detallada de los requisitos luminotécnicos de cada deporte. El cuarto documento es la norma IES RP-6-15 Sports and Recreational Area Lighting [4], este presenta recomendaciones para los deportes más comunes. Como documentos adicionales se deben consultar las recomendaciones de cada asociación y federación.

Al definir el documento normativo referente, se podrán determinar los objetivos lumínicos, definir el valor exacto de las iluminancias horizontales y verticales, uniformidades y límites de deslumbramiento. Tener en cuenta las restricciones de cada deporte, líneas de visión de los jugadores y la dinámica de cada juego.

### 4. Definición de las Luminarias

En esta etapa se describen las estrategias relacionadas con la selección de las luminarias a proyectar. En este punto del diseño se definen los fabricantes, referencias y fotometrías a utilizar. Además, se revisan las dimensiones, pesos y tipo de control de los equipos. Con los requerimientos ya definidos y teniendo en cuenta las restricciones se seleccionan las luminarias más adecuadas.

El primer paso es definir un fabricante. La estrategia consiste en seleccionar un fabricante reconocido, con experiencia en iluminación de escenarios deportivos y que presente un catálogo de productos amplio, de esta manera el producto seleccionado será el adecuado para la instalación.

Asimismo, nos aseguramos que la información necesaria para realizar el diseño sea aportada en su totalidad por el fabricante.

El segundo paso consiste en definir la luminaria, como estrategia se selecciona la luminaria de acuerdo al nivel de iluminancia requerida, si los requerimientos son muy exigentes ( $>1.000 \text{ lx}$ ) se seleccionaran las luminarias con el mayor flujo luminoso. Si el escenario es estándar con un requerimiento menor a 1.000 lx se recomiendan luminarias con un flujo luminoso medio. Se seleccionan tres fotometrías para realizar la simulación, una de haz amplio (Wide), de haz medio (Medium) y de haz estrecho (Narrow). La luminaria debe cumplir con los requerimientos definidos de CRI, TLCI, CCT, IP e IK.

Como último paso se debe revisar que las luminarias seleccionadas se puedan instalar en el escenario, con las características físicas definidas se verifican las limitantes de peso y espacio, si no se cumple, se debe seleccionar otro tipo de luminaria. De esta manera se elige una referencia específica y se solicita la información al fabricante, obteniendo los archivos fotométricos para realizar la simulación. Con la información recibida del fabricante se realizará el cálculo del factor de mantenimiento necesario para la simulación, en este punto también es útil definir el esquema de mantenimiento de la instalación.

### 5. Diseño de Iluminación

El diseño de iluminación es la unión de todos los temas descritos anteriormente, es necesario tener claro el propósito del escenario y los objetivos a alcanzar. En la Fig. 1 se presenta un diagrama resumen de los temas tratados. El primer punto por definir es la herramienta informática a utilizar, el software recomendado para el diseño de iluminación es el DIALux en su versión 4.13, debido a que tiene un módulo para escenarios deportivos el cual facilita el diseño.



Fig 1. Objetivos a definir en el diseño de escenarios deportivos.

Para utilizar el software es necesario incluir toda la información recopilada, en este caso el primer paso es incluir los planos, eliminar achurados y cotas, los cuales pueden interferir en el diseño, adicionalmente se sugiere pasar todas las líneas a un color oscuro. En este punto se debe incluir el modelo 3D, DIALux también permite manejar archivos con extensión .3DS e .IFC. La estrategia para poder utilizar estos modelos es eliminar la superficie inferior, de esta manera la

superficie creada en el DIALux será la superficie de cálculo del escenario. Como ejemplo en la Fig. 2 se presenta el modelo 3D sin la superficie inferior de la cancha, la superficie de la cancha mostrada es la malla de cálculo creada en DIALux. En la Fig. 3 se muestra el modelo ajustado para realizar el cálculo. Adicionalmente, es necesario aplicar texturas y colores de acuerdo al escenario real, con lo cual se obtiene un nivel de detalle mayor.

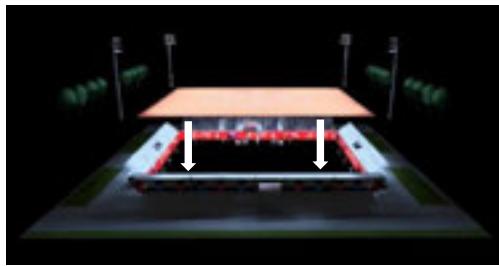


Fig 2. Modelo 3D sin superficie inferior, cancha de tenis.



Fig 3. Modelo 3D ajustado para simulación, cancha de tenis.

El siguiente paso es incluir las mallas de cálculo. La estrategia consiste en utilizar apropiadamente las mallas del software, en la parte de mallas deportivas del software se encuentran gran cantidad de mallas preestablecidas, las cuales tienen unas medidas estándar para cada deporte, estas se pueden variar de acuerdo a las medidas del área donde se practica el deporte. Los puntos de cálculo de estas mallas se realizan automáticamente y sigue el procedimiento descrito en la norma EN 12193 [2]. Se debe seguir la norma al aplicar cada malla de cálculo, las iluminancias horizontales se calculan a nivel de suelo y las iluminancias verticales a un nivel de 1 m [2] (estas pueden variar de acuerdo al deporte). Las mallas para las cámaras se deben configurar de acuerdo con la ubicación de las cámaras en el escenario. Este punto es primordial para la distribución de las luminarias, ya que se deberá dirigir algunas luminarias a estos puntos.

En este punto se debe definir la altura mínima de las luminarias a instalar, de esta manera se evitarán problemas de deslumbramiento. Para los escenarios deportivos en interior la altura estará definida por la estructura del techo y de anclaje.

Para los escenarios deportivos en exterior, una forma para definir la altura de las luminarias es utilizar la ecuación (1), tomada de las recomendaciones para estadios de fútbol de la FIFA [5].

$$h_m = d * \tan \alpha \quad (1)$$

Donde:

$h_m$ : Altura mínima de instalación de luminarias.

$d$ : Distancia máxima desde la base de la fuente lumínosa más baja sobre el horizonte hasta el centro del campo y mirando hacia las tribunas (Fig. 4).

$\tan \alpha$ : Tangente del ángulo mínimo recomendado de 25° y máximo de 45°. Las luminarias deben tener un ángulo de rotación máximo de 70°.

En la Fig. 4 se muestran la geometría de los valores descritos anteriormente. Esta forma de calcular la altura es una recomendación, este parámetro varía de acuerdo con las restricciones y la arquitectura del escenario.

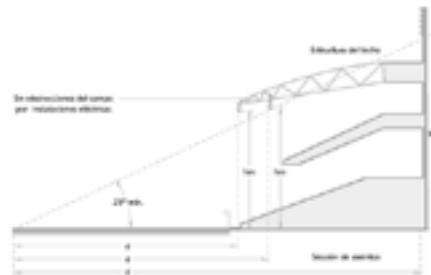


Fig 4. Altura de montaje de las luminarias, recomendación FIFA [5].

La distribución de luminarias se realiza de tal forma que cubra toda la superficie de cálculo del escenario deportivo. La estrategia consiste en dirigir las luminarias hacia puntos específicos, como ya se indicó se tienen las limitantes de la instalación por lo cual se deben respetar, cada deporte tiene lugares donde no es recomendable colocar las luminarias con el fin de evitar el deslumbramiento en los deportistas. La recomendación es iluminar de forma uniforme la cancha, una forma es realizar una distribución en abanico. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de cómo iluminar una cancha de tenis, esta distribución es útil para iniciar el cálculo. Se recomienda que el punto de impacto en la cancha tenga una coordenada definida, de esta manera se direccionaran las luminarias en la etapa constructiva.

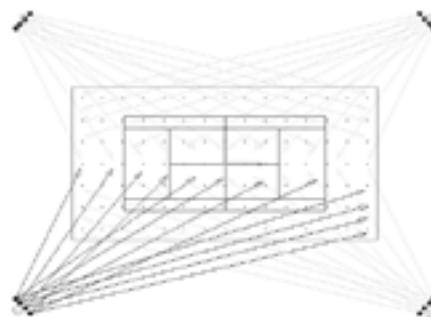


Fig 5. Distribución de luminarias, cancha de tenis.

Los cálculos se deben realizar de tal forma que todos los parámetros se cumplan al mismo tiempo, la estrategia para realizar estos cálculos consiste en realizarlos en secuencia, primero se debe diseñar la iluminancia vertical de cámaras, después seguir con la iluminancia vertical de tribunas, iluminancia horizontal y por último verificar el deslumbramiento. Al realizar cada cálculo se debe verificar que se siga cumpliendo el anterior, de esta manera se entra en un proceso iterativo en el cual al finalizar se deben cumplir todos los parámetros.

#### A. Cálculo de Iluminancia Vertical

Como definición es la iluminancia sobre un plano vertical medida en luxes [6]. El cálculo se debe realizar con la ubicación final de las cámaras, estas se disponen de acuerdo con las dimensiones del escenario deportivo y la cantidad varía con la importancia de los juegos. El cálculo se realiza con una malla de puntos ubicada a una altura mínima de 1 m [2], esta altura varía de acuerdo a los requisitos particulares de cada deporte. Por ejemplo, en un juego de baloncesto en escenario interior, por la altura de los jugadores y el desarrollo del juego, la altura mínima de la malla de cálculo debe ser a 1,5 m [3]. El objetivo de esta malla es asegurar la iluminación para que la cámara tome de forma correcta los rostros de los jugadores y los uniformes.

En la Fig. 6 se muestra la forma de realizar el cálculo, la dirección de los puntos de la malla se dirige hacia la ubicación de la cámara. Para cumplir con los objetivos lumínicos se debe asegurar que las luminarias aporten lo necesario en el sentido donde se realiza el cálculo, de esta manera se cumple con los niveles requeridos.

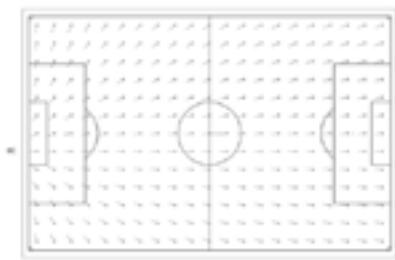


Fig 6. Puntos de cálculo para una cámara, cancha de fútbol.

El nivel de iluminación se debe calcular para cada cámara. Como ejemplo, para la correcta iluminación de la cámara de la Fig. 6, se deben colocar luminarias en la parte de atrás, de tal forma que me permita iluminar todo el plano.

Otro factor que se debe calcular es la uniformidad, para el diseño de iluminación se calcula en relación a niveles de iluminación,  $U_d$  y  $U_o$ .

La diversidad  $U_d$ , nombrada comúnmente también como uniformidad, se define como la relación de la iluminancia mínima y la iluminancia máxima de una superficie [6], como se muestra en (2).

$$U_d = \frac{E_{min}}{E_{max}} \quad (2)$$

La uniformidad  $U_o$  se define como la relación de la iluminancia mínima y la iluminancia promedio de una superficie, como se muestra en (3).

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (3)$$

La estrategia para obtener la uniformidad requerida es dirigir algunas luminarias hacia los puntos de iluminancia mínima, estos puntos por lo general son las esquinas opuestas a la ubicación de las cámaras, este es el punto más alejado y donde se tienen los valores mínimos de iluminancia. Para las cámaras de campo, el punto crítico a iluminar es el más próximo a la cámara. En la Fig. 7 se presenta un ejemplo de los puntos a iluminar de acuerdo a la ubicación de las cámaras.

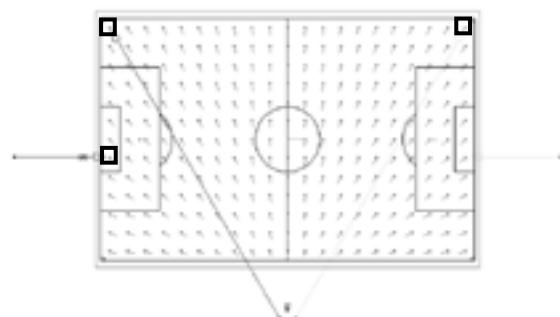


Fig 7. Direccionamiento de luminarias a puntos críticos para mejorar la uniformidad vertical en cámaras.

Para el caso de que no se manejen cámaras de televisión, el cálculo se realizará en los cuatro planos verticales de la cancha, esto quiere decir que los puntos se dirigen al plano 0°, 90°, 180° y 270°. Este cálculo asegura la adecuada visión de los espectadores.

#### B. Cálculo de Iluminancia Horizontal

Se define como la iluminancia sobre un plano horizontal [6]. El cálculo típico se realiza con la malla ubicada a nivel de suelo con el número de puntos indicado en la norma. Como estrategia de cálculo para mejorar los niveles de iluminancia y uniformidad es buscar el punto con el valor mínimo y mejorarlo. Para mejorarlo se deben direccionar las luminarias cercanas, moviéndolas en pequeños pasos y tratando de no afectar el cálculo de la iluminancia vertical. Si no es posible se deben adicionar más luminarias y dirigirlas hacia ese punto. Otra estrategia es cambiar la fotometría de las luminarias, utilizando fotometrías con un haz más estrecho. DIALux tiene la facilidad de ver el cálculo en tiempo real, se debe activar para el tipo de iluminancia y aplicar la estrategia descrita.

#### C. Cálculo del Deslumbramiento

Definida como la condición de la visión en la que hay incomodidad o una reducción en la capacidad de ver detalles u

objetos, causada por una distribución o rango de luminancias inadecuadas [6]. Este factor se debe tener en cuenta desde el inicio del diseño, al seguir las recomendaciones de cada deporte. Factores como el cálculo de la altura mínima y la no inclinación a más de 70° de las luminarias [5], son estrategias útiles para disminuir el deslumbramiento en la cancha. El cálculo de este factor se realiza con los mismos puntos de la malla de iluminancia vertical, se adiciona un observador a cada punto a se mide a la altura de los ojos de los deportistas [2].

Si al realizar el cálculo este valor supera el límite estipulado en la norma se aplican las siguientes estrategias. La primera estrategia consiste en adicionar más luminarias y dirigirlas hacia los alrededores de la cancha, esta estrategia pretende aumentar la luminancia de fondo de los alrededores, ayudando a tener una luminancia de fondo apropiada [4]. La segunda estrategia consiste en aumentar la altura de las luminarias, reduciendo el ángulo sólido producido por estas y disminuyendo el deslumbramiento directo [4]. Como última estrategia se deberá direccionar las luminarias de forma que queden lo más alejado del punto de visión de los deportistas [4].

## 6. Presentación de Resultados

Después de realizar la simulación y obtener los resultados, se debe organizar y presentar toda la información obtenida. Como recomendación se deberán entregar tres documentos, el primero es la Memoria de Cálculo donde se especifica y justifica todas las decisiones tomadas, se muestra el cálculo del factor de mantenimiento y el esquema de mantenimiento de la instalación, también se debe incluir las normas consultadas y los resultados obtenidos. El segundo documento es el informe de la simulación realizada, con todos los parámetros calculados. El tercer documento es el plano de montaje, ubicación y proyección de las luminarias, presentando las coordenadas de los puntos de impacto de cada luminaria, esta información es importante en terreno, ya que cualquier variación en el direccionamiento de las luminarias ocasionara una mala iluminación. En la Fig. 8 se presenta un ejemplo de cómo al variar el ángulo de la luminaria en 2 grados, se produce un movimiento del haz luminoso en  $\pm 5,5$  metros [4], de esta forma se producen los errores de montaje en terreno. Es recomendable presentar detalles de anclaje y montaje.



Fig 8. Un error de 2° en el direcciónamiento de la luminaria, puede producir un movimiento del haz luminoso de  $\pm 5,5$  m.

En la Fig. 9 se muestra un diagrama de flujo el cual se recomienda seguir para poder realizar un correcto diseño de iluminación en escenarios deportivos.

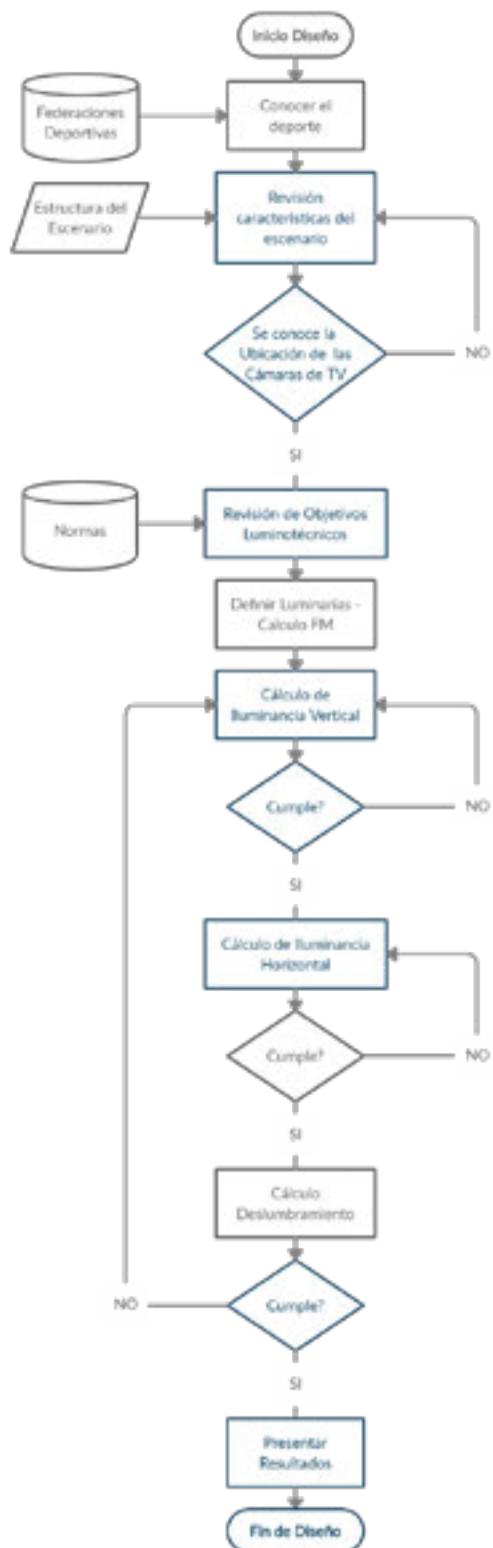


Fig 9. Diseño de Iluminación de escenarios deportivos.

Si se requiere realizar una presentación visual de la simulación realizada, la estrategia consiste en efectuar el cálculo en el software DIALux Evo incluyendo el modelo 3D, este programa tiene un buen renderizado y esta versión está enfocada en obtener un comportamiento de la luz mejorada y más realista.

## 7. Conclusiones

Para el diseño de iluminación en escenarios deportivos es necesario tener en cuenta varios parámetros de varias especialidades, estos diseños deben ser realizados interdisciplinariamente. En este documento se describen varias estrategias y se da una guía de cómo realizar este tipo de diseños. Al aplicar estas estrategias se reducirán los tiempos de cálculo y se optimizarán los procesos de diseño.

Las estrategias planteadas son aplicables a cualquier tipo de escenario deportivo, ya sean en interior, exterior, o escenarios de gran tamaño, también aplican en canchas pequeñas. Se espera que cada diseño sea desarrollado de forma óptima y en el menor tiempo posible.

## 8. Referencias

- [1] Illuminating Engineering Society, *The Lighting Handbook - Reference And Application*, New York: Illuminating Engineering Society of North America (IES), 2011.
- [2] European (EN) Standards of the European Committee for Standardization, *EN 12193 - Light and lighting Sport Lighting*, 2007.
- [3] Ministerio de Cultura y Deporte del Gobierno de España, «Ministerio de Cultura y Deporte - Normas NIDE,» Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.csd.gob.es/es/csd/installaciones/politicas-publicas-de-ordenacion/normativa-tecnica-de-instalaciones-deportivas/normas-nide>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [4] Illuminating Engineering Society - IES, *IES RP-6-15 Sports and Recreational Area Lighting*, Illuminating Engineering Society, 2015.
- [5] Federación Internacional de Fútbol Asociación (FIFA), «Estadios de Fútbol - Recomendaciones Técnicas y requisitos,» 2011.
- [6] International Commission on Illumination, «CIE,» 2014. [En línea]. Available: <http://eilv.cie.co.at/term/1397>. [Último acceso: 08 2020].

## 9. Biografías

**Diego Varon Peña.** Ingeniero Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá. Especialista en Iluminación Pública y Privada de la Universidad Nacional de Colombia. El proyecto de especialización fue el diseño de iluminación del Estadio Olímpico Pascual Guerrero ubicado en la ciudad de Cali, Colombia. Sus intereses están relacionados con el alumbrado público, iluminación de escenarios deportivos y aplicaciones de la iluminación dinámica en el espacio público.

**Angélica Vargas.** Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Cundinamarca, Especialista en Iluminación y Magíster en Automatización de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en Control, Diseño de

Iluminación y en Planeación de Sistemas de Alumbrado Público.

**Mauricio Polanco.** Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, Especialista en Iluminación de la Universidad Nacional de Colombia. Experto en áreas temáticas de Iluminación Urbana y alumbrado público, actualmente consultor para su estudio de diseño LÉXICA LightInk.

# “Conexión natural” por medio de la experiencia nocturna.

Hugo Molina<sup>1</sup>, Pablo Chavarría<sup>2</sup>

Unidad Técnica de Alumbrado Público. Intendencia de Montevideo

[hugo.molina@imm.gub.uy](mailto:hugo.molina@imm.gub.uy) - [pablo.chavarria@imm.gub.uy](mailto:pablo.chavarria@imm.gub.uy)

**Resumen**— este trabajo describe el proceso para el diseño del proyecto de iluminación en el espacio público “Parque Eugenio Baroffio”. Mediante la aplicación de una metodología se desarrolla el light concept y de forma posterior la instrumentación técnica.

El parque se localiza en el entramado urbano de la ciudad de Montevideo, de desarrollo lineal comunica el gran “Parque Rivera” con el paseo marítimo de la costa capitalina. El carácter natural con importante presencia de monte nativo es un componente sustancial para el abordaje del proyecto lumínico. Se tomaron en cuenta aspectos históricos, urbanísticos, morfológicos, de percepción emocional y de carácter técnico para lograr una propuesta de iluminación centrada en el usuario final del parque. Durante el desarrollo del proyecto se realizaron instancias de comunicación con las partes interesadas y pruebas en sitio para lograr una solución final consensuada.

El desarrollo del light concept tomo sus bases en la influencia de la iluminación urbana en las emociones ocasionadas por el paisaje, y en las intenciones previas celebradas con los usuarios frecuentes. Las bases fueron tomadas de trabajos realizados por profesionales con bastos estudios técnicos y estadísticos. Se utilizó el concepto de “conexión natural” para el diseño de la propuesta lumínica de todo el parque. La intervención promueve el uso del parque en otra franja horaria a través de la tecnología incorporada, sin interferir en el entorno natural. Mejorar el vínculo entre el usuario y el parque a través de la incorporación de la luz, aumentando la sensación de seguridad y la conexión con otros espacios de esparcimiento.

Los resultados de la intervención lumínica se cuantificaron mediante el uso de software, mediciones in situ, relevamientos fotográficos y encuestas de opinión. La interacción con los usuarios del parque fomentó una colaboración participativa desde la concepción del proyecto. El acondicionamiento lumínico introduce el valor de la experiencia nocturna en el espacio público a instancias de la iluminación urbana, sin dejar de tener la posibilidad de contemplar el cielo estrellado.

**Palabras clave.** Diseño, emociones, natural, experiencia nocturna

**Abstract.** - This work describes the process for the design of the lighting project in the public space “Parque Eugenio Baroffio”. Through the application of a methodology, the light concept is developed and subsequently the technical instrumentation.

The park is located in the urban fabric of the city of Montevideo, with a linear development that connects the great “Parque Rivera” with the promenade of the capital's coast. The natural character with an important presence of native forest is a substantial component for the

approach to the lighting project. Historical, urban, morphological, emotional perception and technical aspects were taken into account to achieve a lighting proposal focused on the end user of the park. During the development of the project, communication with the interested parties and on-site tests were carried out to achieve a final agreed solution.

The development of the light concept took its bases on the influence of urban lighting on the emotions caused by the landscape, and on the previous events celebrated with frequent users. The bases were taken from works carried out by professionals with extensive technical and statistical studies. The concept of "natural connection" was used for the design of the lighting proposal for the entire park. The intervention promotes the use of the park in another time slot through the incorporated technology, without interfering with the natural environment. Improve the link between the user and the park through the incorporation of light, increasing the feeling of security and the connection with other recreational spaces.

The results of the light intervention were quantified through the use of software, in situ measurements, photographic surveys and opinion polls. Interaction with park users fostered participatory collaboration from the conception of the project. The light conditioning introduces the value of the nocturnal experience in the public space at the request of urban lighting, while still having the possibility of contemplating the starry sky.

**Key Words.** Design, emotions, natural, night experience

## 1. Introducción

La propuesta solicitando la iluminación del Parque Eugenio Baroffio llega por medio del Presupuesto Participativo que asegura a los y las habitantes de Montevideo el derecho de participación universal para proponer y luego decidir mediante el voto secreto la realización de obras y servicios sociales de interés vecinal, los que se financian con el presupuesto de la Intendencia de Montevideo. Es un programa Departamental que se desarrolla e implementa a nivel local desde los ocho Municipios del departamento.

El Presupuesto Participativo contribuye a hacer más eficaces las acciones de la Intendencia, ya que se definen y

organizan intervenciones en función de las necesidades reales. Esto permite un uso democrático de los recursos municipales, porque montevideanos y montevideanas pueden priorizar las obras y servicios a ejecutar en su zona.

Posteriormente a una evaluación inicial por parte de un equipo multidisciplinario conformado por Técnicos, Asistentes Sociales, Concejales Vecinales, Directores, etc..., se realiza una jornada de votación abierta en toda la ciudad. Siendo las propuestas más votadas las que se ejecutan con un presupuesto determinado.

Es así como la solicitud de iluminación del Parque Baroffio llega a la oficina de Diseño de la Unidad Técnica de Alumbrado Público.

## 2. Punto de partida

### 2.1 Ubicación

El parque está inmerso en el entramado urbano costero, los barrios que lo rodean se encuentran consolidados y son de características residenciales, con la gran impronta de ser colindantes al Parque Rivera y a la emblemática rambla de Montevideo. Por lo que el vínculo del Parque Baroffio con el Río de la Plata es de excepcional importancia.

Se desarrolla linealmente entre dos importantes vías de tránsito de la ciudad, contando con el arroyo del Molino de Pérez como una de sus principales características naturales y algunas instalaciones como una senda peatonal que lo recorre longitudinalmente, dos cruces trasversales que comunican los barrios que se encuentran a lo largo de sus bordes laterales y cuatro sectores donde se encuentran equipos de gimnasia y recreación.

Sobre el extremo sur del parque se encuentra un pequeño monte nativo que por su característica paisajística e histórica será punto de especial tratamiento lumínico. “Fig. 1 y Fig. 2”



Fig 1. Ubicación en Montevideo



Fig 2. Área del proyecto (área de intervención demarcada)

### 2.2 Entorno social

Siendo un gran espacio verde en un entorno residencial, los distintos usuarios en su gran mayoría son adultos mayores que gustan de paseos tranquilos y amenos, jóvenes de instituciones educativas cercanas que desarrollan actividades de recreación y deporte, y niños que juegan por los amplios sectores. Es un lugar donde no existe una gran circulación de gente de otros barrios, sino que el usuario característico es el vecino del barrio circundante.

### 2.3 Lineamientos estratégicos

La Intendencia Departamental de Montevideo cuenta con 6 lineamientos estratégicos, de los que tomamos por estar directamente vinculados los siguientes:

- Potenciar el relacionamiento con la ciudadanía y la participación.
- Fortalecer la inclusión social y la convivencia

Estos lineamientos son insumos importantes a la hora de actuar en éste caso en el espacio público.

### 3. Desarrollo (metodología de diseño)

Para lograr llegar al light concept se tomaron insumos variados como:

#### 3.1 Reseña histórica

El parque surge en 1956 a partir de una intervención que propone la restauración del antiguo Molino de Pérez y la creación de un espacio público en torno al edificio, a lo largo del arroyo del mismo nombre. Esto da como resultado la conformación de un espacio verde lineal constituido por un pequeño monte indígena que, conjugando valores paisajísticos e históricos, marca un punto singular en el paisaje, costero. En tal sentido, son destacables las características canteras visibles desde la rambla, que ofrecen un particular marco ambiental al parque y al viejo molino. [1].

Es un lugar recogido, en el que hay un parquecito natural con el arroyuelo, al que sólo falta darle el ambiente a nuestros árboles criollos. Un parque lineal comunicará así la rambla con el Parque Rivera, alrededor del arroyo, que conservará sus caprichosas curvas evitando las duras formas que se le han dado al arroyo Miguelete, que han roto la poesía de sus orillas arboladas. [2]. "Fig. 3"



Fig 3. Espacio en 1966 (monte nativo demarcado)

#### 3.2 Desarrollo lineal

El largo total del parque es de 850 m y su ancho promedio es de 70 m.

Al acceder por el extremo ubicado sobre Av. Gral. Rivera se encuentra el monte nativo, a lo largo del recorrido se ubican distintos grupos de árboles de altura importante (unos 30m aprox.) a ambos lados del perímetro del espacio. La senda peatonal conecta las distintas

estaciones de ejercicios y culmina en el otro extremo sobre Av. Italia.

Existen dos cortes transversales que cuentan con puentes peatonales sobre el arroyo del Molino de Pérez, mismo que circunda linealmente todo el espacio. "Fig. 4"

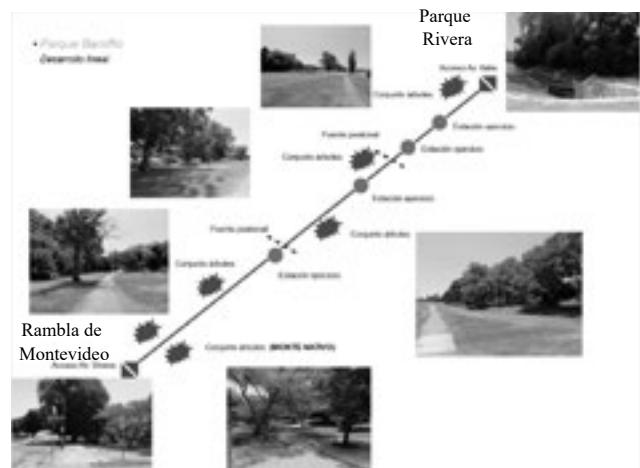


Fig 4. Esquema lineal del espacio

#### 3.3 Percepción del espacio

Al momento de la presentación de la propuesta por parte de los vecinos, plasmaron algunas inquietudes como ser:

- posibilidad de hacer uso del parque en horario nocturno (ya que no cuenta con iluminación)
- brindar condiciones de seguridad para los visitantes.

Se realizaron reuniones previas con los interesados para recabar información relevante y se realizaron visitas nocturnas y diurnas para poder tener una percepción del entorno a intervenir.

Durante esas visitas se llegó a la conclusión que:

- al recorrer el espacio la sensación es de estar inmersos en una zona alejada de lo urbano.
- existen variados grupos de árboles en todo el perímetro lateral a ambos lados del espacio lo que brinda un respaldo natural excepcional y profundiza la sensación de que al caminar nos conectamos con lo natural.
- existen muy pocos elementos construidos y/o modificados por el hombre.
- durante la noche hay una clara percepción de inseguridad, ya que al caminar es imposible

- discriminar presencia de otras personas o elementos con facilidad.
- a pesar de encontrarse en la ciudad es posible apreciar las estrellas con facilidad.

### 3.4 Las emociones y el espacio urbano durante la noche.

La tesis doctoral “Luz y Emociones: Estudio sobre La Influencia de la Iluminación Urbana en las Emociones; tomando como base el Diseño Emocional”, nos plantea y desarrolla lo siguiente:

#### Hipótesis

La influencia de la iluminación urbana en el observador, supera los aspectos funcionales, llegando a generar en los mismos una respuesta emocional. En consecuencia, interviene en el grado de valoración de los espacios urbanos nocturnos y en el sentido de bienestar emocional de ciudadanos y visitantes, por lo que se precisa una investigación concerniente para incorporar estos aspectos en el diseño lumínico. [3].

#### Objetivos generales

- Investigar la relación entre la iluminación urbana y la respuesta emocional del observador para proponer consideraciones respectivas en su diseño.

#### Objetivos particulares

Investigar los efectos de la iluminación urbana en las emociones del observador.

- La investigación de las emociones que pueden experimentarse a partir de un ambiente lumínico.

Estudiar si existe alguna relación entre los parámetros de la iluminación y las emociones experimentadas.

- Las características de la iluminación y su relación emocional con el observador.

#### Conclusiones iniciales

En términos generales se observa que existe una mayor relación entre los parámetros:

intensidad-difusión----- reacciones emocionales  
(implican mayor acción o exaltación, como diversión o fascinación o miedo y cariño)  
color-uniformidad---mensaje emocional de la iluminación  
(implican expectativas de un cierto grado de originalidad o de sorpresa, agradable o desagradable)

#### Conclusión general

La iluminación urbana influye sobre las emociones de los observadores, por lo que las consideraciones emocionales no deben ser omitidas en su diseño, sino que es necesario incorporarlas como un aspecto importante de mejoramiento de la calidad ambiental de la vida urbana y para el sentido de bienestar emocional del propio usuario.

- *Los Aspectos Emocionales del ser humano en la iluminación -con relación a la morfología urbana*  
Que definimos en 4 requerimientos clave:
  - Requerimientos afectivos/cariño.
  - Requerimientos de placer /juego.
  - Requerimientos de significación/fascinación.
  - Requerimientos de seguridad /protección.
- *La eficiencia del diseño lumínico*

Si entendemos como eficiencia lumínica la relación satisfactoria entre la energía empleada y los resultados ambientales obtenidos, cabe sobremodo la inclusión de los factores emocionales para mejorar la calidad de los resultados en relación a la energía empleada. [3].

### 3.5 Instancias de comunicación

Uno de los elementos importantes de la metodología de trabajo fueron las diferentes instancias de intercambio y comunicación con los proponentes y algunos de los usuarios habituales del parque.

Inicialmente las instancias fueron para recabar apreciaciones particulares del entorno del espacio, usos particulares y aspectos cualitativos que al entender de los proponentes eran significativos.

Durante el desarrollo del método las instancias fueron para mostrar avances y definiciones técnicas, no solo para explicar los fundamentos de la propuesta lumínica sino incluso realizar pruebas lumínicas insitu. “Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7”



Fig 5. Reuniones con vecinos



Fig 6. Pruebas lumínicas con vecinos



Fig 7. Pruebas lumínicas con vecinos

## 4. Pautas de iluminación

### 4.1 Aspectos conceptuales

Por medio de la vinculación de las premisas anteriormente detalladas (metodología de diseño) se promueve el concepto lumínico a desarrollar: “Conexión Natural”

- implementación de un “camino de luz” con un recorrido claro y ameno.
- ambientación de grupos de árboles a lo largo del paseo.
- permitir “conectarse” mientras se realiza el paseo.
- Puesta en valor de lo natural durante la experiencia nocturna

### 4.2 Aspectos técnicos

- Postaciones peatonales
  - simples, carentes de aristas duras.
  - Altura punto de luz 4,50 m
  - interdistancia 30 m.
  - temperatura de color 3000° K
  - CRI 80 (índice de reproducción cromática)
- Postaciones de acentuación
  - junto a puentes peatonales.
  - Altura punto de luz 6 m
  - temperatura de color 4000° K
  - CRI 80 (índice de reproducción cromática)
- Postaciones en sectores grupos árboles
  - a nivel de piso en estructuras antivandálicas
  - temperatura de color 4000° K
  - ángulos 10°
  - CRI 70 (índice de reproducción cromática)

### 4.3 Aspectos de control

Para toda la instalación propuesta se instrumentará un sistema de control de iluminación, dicho sistema afectará de forma independiente las sendas, los grupos de árboles.

Por éste medio se pretende incidir en el flujo de iluminación propuesto según ciertos horarios pre establecidos y diferenciados para las distintas situaciones proyectadas.

A modo de ejemplo en el horario de menor frecuencia de uso se dimerizarán las luminarias peatonales para poder crear las condiciones de apreciar el cielo estrellado.

En cuanto a los grupos de árboles se pretende apagar la iluminación propuesta en horarios de la madrugada para no solo gestionar eficientemente la energía sino en particular para minimizar la influencia de la luz en los árboles existentes. “Fig. 8”

## 5. Proyecto de iluminación detallado

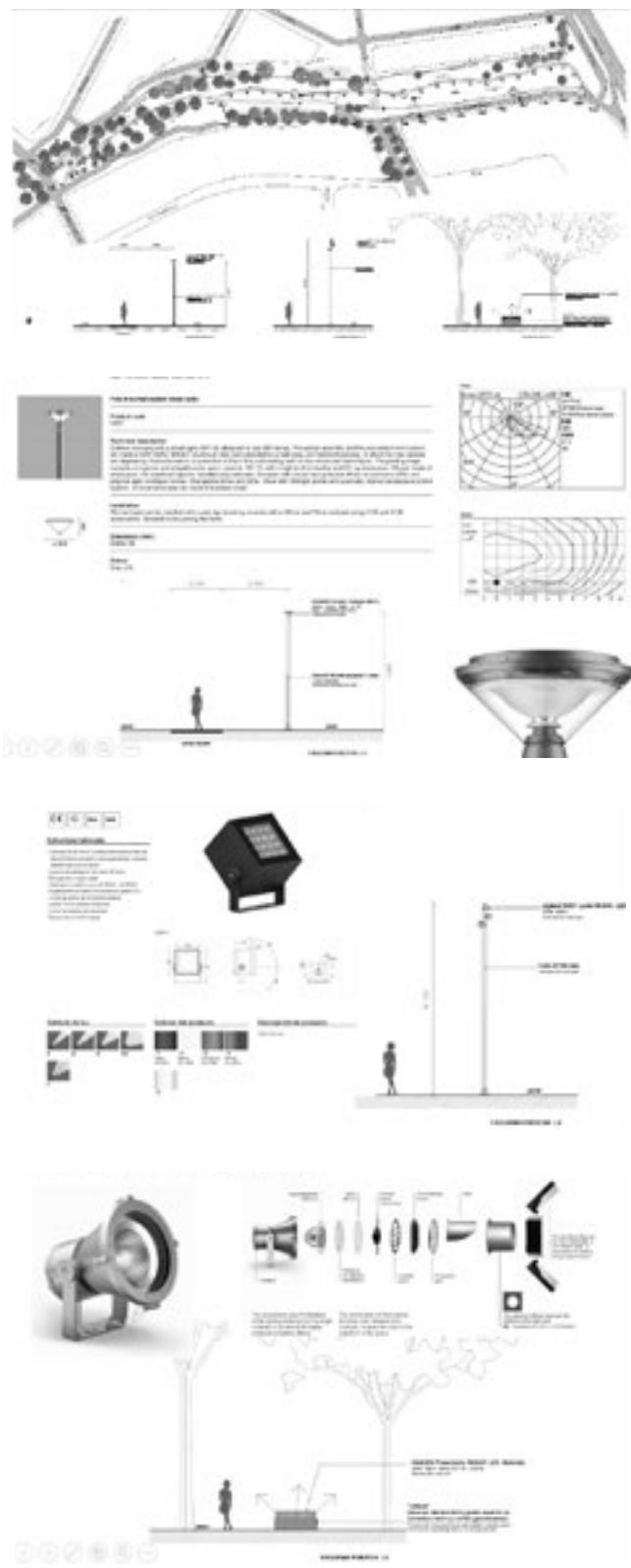


Fig 8. Recaudos gráficos del proyecto

## 6. Conclusiones

Este trabajo cualitativamente muestra el diseño de iluminación para un espacio público. Aplicando un método que toma insumos históricos, paisajísticos, perceptivos y emocionales. Dichos insumos no solo provienen del proyectista sino de los usuarios finales del espacio intervenido. “Fig. 9”

Como conclusión inicial se entiende que los espacios públicos son de los ciudadanos y por ende deben ser intervenidos tomando en cuenta a éstos y haciéndoles partícipes del proceso, esto no solo logra involucramiento sino apropiación. A su vez es primordial tomar en cuenta los aspectos emocionales de los usuarios, estos aspectos son inherentes a cada cultura y sociedad. Pero dichas emociones por medio de la intervención en la iluminación del espacio se ven afectadas para bien o para mal. Como proyectistas debemos tener empatía y así poder disipar las emociones negativas e influir en las positivas para lograr una experiencia nocturna que ponga en valor los distintos aspectos del espacio público.

Los diseñadores de iluminación no son meramente técnicos que resuelven de manera racional los distintos parámetros y requerimientos lumínicos, sino que deben integrar y establecer una comunicación con los que en definitiva son los usuarios finales.

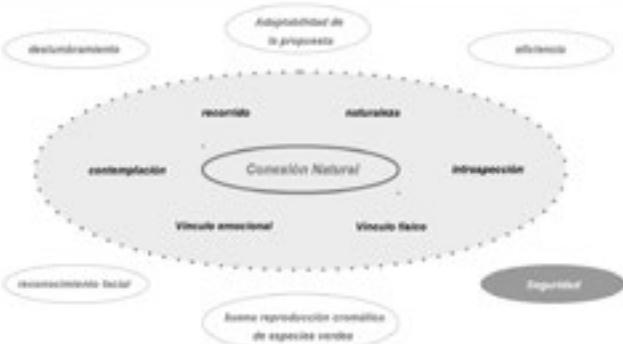
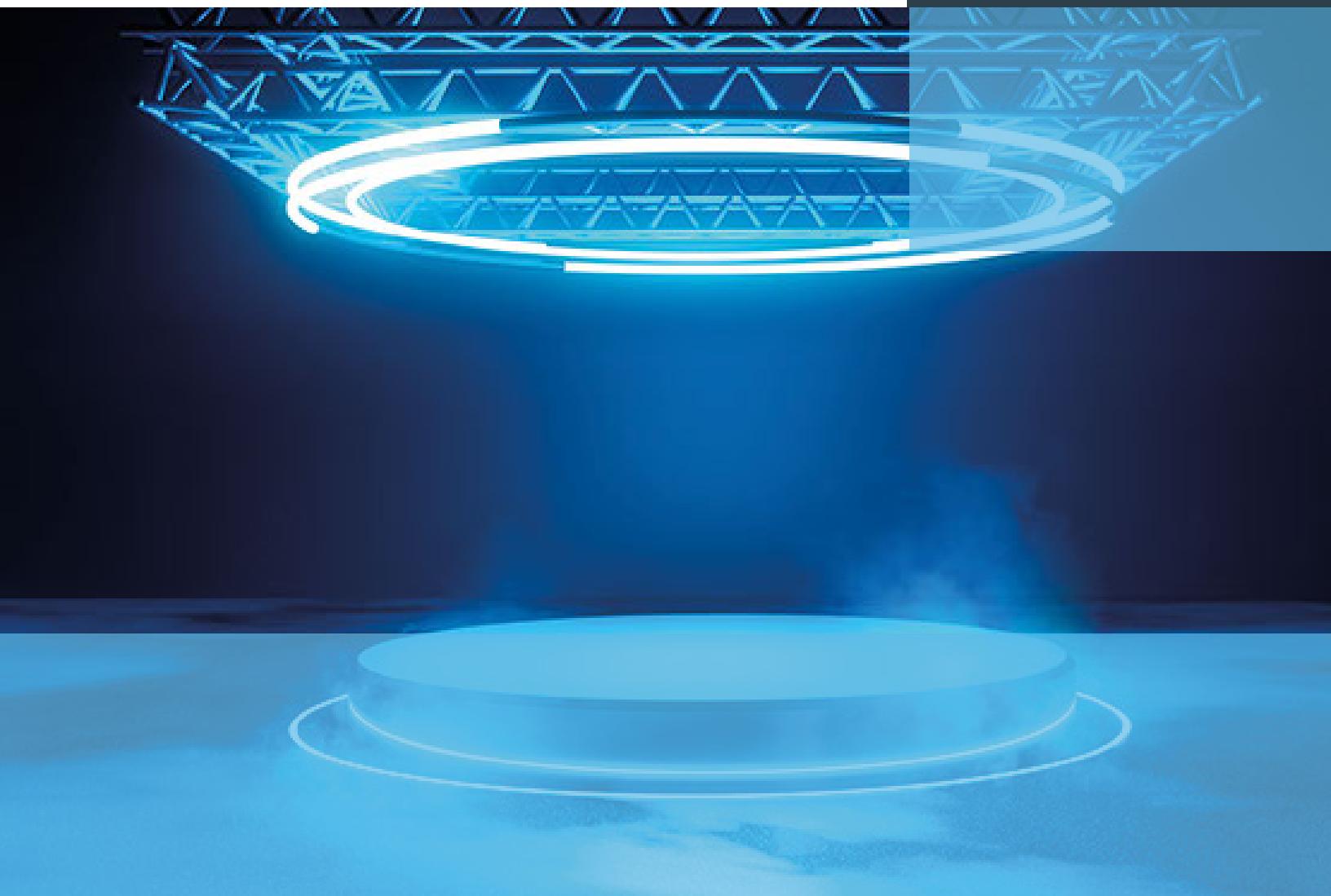


Fig 9. Esquema de acercamiento al light concept

## 7. Referencias

- [1] Tomado de: AAVV. Guía Carrasco / Punta Gorda. Montevideo. Elarqa Tomo 6. Montevideo: Dos Puntos, 1999.
- [2] Tomado de: Abella Trías, Julio C., Montevideo. La ciudad en la que vivimos. Su desarrollo, su evolución y sus planes. Montevideo, 1960.
- [3] Doctoranda: Amparo Berenice Calvillo Cortés - “Luz y Emociones: Estudio sobre La Influencia de la Iluminación Urbana en las Emociones; tomando como base el Diseño Emocional” Tesis Doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya, Marzo. 2010.



## **Sección 3.**

## **Nuevas tecnologías en iluminación**

# Modelo de optimización lineal entera mixta aplicado a la planificación multiperíodo de inversiones en sistemas de alumbrado público

Cristhian C. Rodríguez J.<sup>1</sup>, Andrés A. Romero Q.<sup>2</sup> Gastón O. Suvire.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Instituto de Energía Eléctrica-CONICET-UNJS, San Juan J5407, Argentina

<sup>1</sup>[ccrodriguez@iee.unsj.edu.ar](mailto:ccrodriguez@iee.unsj.edu.ar)

<sup>2</sup>[aaromero@iee-unsjconicet.org](mailto:aaromero@iee-unsjconicet.org)

<sup>3</sup>[gsvire@iee-unsjconicet.org](mailto:gsvire@iee-unsjconicet.org)

**Resumen**—En este artículo se propone una metodología de toma de decisiones que apoya al administrador del sistema de alumbrado público, en la planificación de inversiones para la modernización del sistema. La metodología incluye un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperíodo cuyo objetivo es maximizar la eficiencia energética, sujeto al presupuesto y a los ahorros energéticos futuros. Las variables tomadas en cuenta son: el tiempo que tiene el administrador para la ejecución del proyecto, el costo de la energía, las posibles acciones a implementar y sus costos. La metodología propuesta se empleó para analizar las inversiones óptimas a realizar en un sistema de alumbrado público en Colombia. De los resultados obtenidos se resalta la importancia de una planificación que considere optimización multiperíodo, debido a la cantidad de posibilidades existentes de inversión, las cuales deben ser combinadas de forma óptima para maximizar el ahorro de energía durante el periodo de planificación. La metodología propuesta en este artículo logra maximizar el ahorro de energía asegurando un mejor uso de los recursos públicos, y por lo tanto, representa en sí misma una herramienta de utilidad para los administradores y tomadores de decisión en sistemas de alumbrado público.

**Palabras clave**— Eficiencia energética, Programación lineal entera mixta, Modernización, Asignación de recursos.

## Nomenclatura

Parámetros	Descripción
<b>L</b>	Conjunto de tipos de luminarias
<i>L</i>	Número de tipos de luminarias pertenecientes a L
<i>l</i>	Tipo de luminaria genérico en L, con $l = 1, 2, \dots, L$
<b>T</b>	Conjunto de períodos de tiempo (años)
<i>T</i>	Número de períodos de tiempo
<i>t</i>	Período de tiempo en T, con $t = 1, 2, \dots, T$
<b>J</b>	Conjunto de alternativas tecnológicas de inversión
<i>J</i>	Número de alternativas tecnológicas de inversión
<i>j</i>	Alternativa tecnológica en J, p.ej. conectada a red, con modulo PV, etc., con $j = 1, 2, \dots, J$
<i>PI<sub>t</sub></i>	Presupuesto inicial en USD, para cada periodo <i>t</i>
<i>N</i>	Cantidad total de luminarias existentes en el sistema de alumbrado público
<i>N<sub>l</sub></i>	Cantidad de luminarias existentes en el sistema por tipo de luminaria
<i>CE</i>	Costo de la energía (USD/kWh)
<i>CTI</i>	Capital total de la inversión realizada en el sistema de alumbrado público (USD)

<i>Cl<sub>j,l</sub></i>	Costo de implementación por alternativa de inversión <i>j</i> y tipo de luminaria <i>l</i> (USD)
<i>A<sub>j,l</sub></i>	Ahorros energéticos percibidos por la implementación de la alternativa <i>j</i> , para el tipo de luminaria <i>l</i>
<i>P<sub>l</sub></i>	Potencia nominal por tipo de luminaria <i>l</i> previo a la inversión (estado actual en w)
<i>P<sub>j,l</sub><sup>*</sup></i>	Potencia nominal por alternativa de inversión tecnológica <i>j</i> y tipo de luminaria <i>l</i> (estado futuro posterior a la inversión)
<i>E<sub>l</sub></i>	Consumo energético anual, por tipo de luminaria <i>l</i> previo a la inversión (consumo actual en kWh/año)
<i>E<sub>j,l</sub><sup>*</sup></i>	Consumo energético anual, por alternativa de inversión tecnológica <i>j</i> y tipo de luminaria <i>l</i> (consumo futuro en kWh/año)
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<i>LD<sub>l,t</sub></i>	Luminarias disponibles para ejecutar acciones de modernización en el periodo <i>t</i> , tras las inversiones realizadas en el periodo previo ( <i>t-1</i> ), de acuerdo con el tipo de luminaria <i>l</i>
<i>PT<sub>t</sub></i>	Presupuesto total destinado a inversiones de modernización para cada periodo <i>t</i>
<i>X<sub>j,l,t</sub></i>	Cantidad de acciones a implementar de la alternativa <i>j</i> , por cada tipo de luminaria <i>l</i> , en el periodo <i>t</i>

## 1. Introducción

Incrementar la eficiencia energética es un tema de gran importancia para el desarrollo de la sociedad, el cual ha sido impulsado en los últimos años por la concientización generada ante la advertencia de agencias internacionales, como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con relación al calentamiento global [1].

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE), se recomienda dar prioridad al mejoramiento de eficiencia energética en edificios, electrodomésticos, iluminación, transporte, industria, servicios públicos de energía, etc. Además, la AIE en su más reciente estudio del 2018, encontró que han aumentado en un 3% las inversiones en eficiencia energética, logrando 236 mil millones de dólares adicionales, comparando 2017 con 2016 [2].

Por su parte, el sector de alumbrado público representa cerca del 3,19% de la energía consumida a nivel global y, específicamente, en Colombia un 3%, lo que equivale a 2.122

GWh [3]. Por esta razón, resulta relevante llevar a cabo proyectos que mejoren la eficiencia energética de estos sistemas de iluminación. A continuación, se listan algunos proyectos relevantes, en los que se busca modernizar el parque de luminarias existentes reemplazándolas por luminarias LED:

- La ciudad de Nueva York (USA) tiene como objetivo cambiar 500.000 luminarias de alumbrado público a LED para el 2025 [4].
- La ciudad autónoma de Buenos Aires (ARG) logró su objetivo de cambiar más de 158.000 luminarias para 2019, convirtiéndose así en la primera capital de Latinoamérica 100% LED [5].
- Bogotá (COL) se comprometió a finalizar el 2019 con el reemplazo de 150.000 luminarias LED [6].

En la literatura sobre eficiencia energética dirigida al alumbrado público, se han detectado tres ramas de estudio. La primera se encuentra dirigida al mejoramiento de la eficiencia energética a partir de los diseños de iluminación, y se logra por medio de la selección de una combinación adecuada de parámetros de diseño como son: interdistancia entre luminarias, altura de montaje, ángulo de inclinación, avance sobre la calzada, ancho de calzada, tipo de tecnología, fotometría de la luminaria, etc., [7], [8].

En segunda instancia se encuentran investigaciones relacionadas con la creación de algoritmos de control para iluminación inteligente. Para ser aplicables, se requiere que cada luminaria cuente con un dispositivo de control que le permita ser autogestionada, ubicando estratégicamente una cantidad considerable de sensores que permitan determinar el estado de ocupación de las calles. Como resultado, el sistema de iluminación se adapta en tiempo real, dimerizando cada luminaria según la necesidad [9].

Por último, se encuentran los modelos de optimización enfocados en la planificación del sistema. Esta línea de investigación tiene en cuenta los estudios previamente nombrados, que son utilizados como datos de entrada. Estos pueden tener un enfoque clásico, que le permite seleccionar entre un conjunto de alternativas aquellas de mayor impacto. También se encuentran estudios que plantean optimizaciones multiobjetivo en las que, a partir de indicadores de desempeño, se encuentra una estrategia óptima para comenzar la modernización [10]. En [11], se presentó una metodología de optimización multiperíodo aplicada a un sistema pequeño de alumbrado público en la ciudad de Bari, Italia.

Este artículo propone una metodología de optimización basada en programación lineal entero mixta (MILP) multiperíodo que, a partir del estado actual del sistema de alumbrado público, permite evaluar las diferentes alternativas tecnológicas de inversión presentes en el mercado (diferentes fabricantes), teniendo en cuenta tanto la parte técnica como la económica. Entregando como resultado un plan óptimo de inversiones. Adicionalmente, esta metodología determina el

capital de inversión requerido para modernizar completamente el parque de luminarias, entregando un valor mínimo de presupuesto inicial.

## 2. Propuesta metodológica

Los sistemas de alumbrado público, por su naturaleza de carácter público, tienen asociados componentes técnicos, sociales, ambientales y económicos. Debido a esto, resulta de alta complejidad tomar decisiones óptimas que evalúen las inversiones a realizar por parte del administrador del sistema. Adicionalmente, los sistemas de alumbrado público en ciudades cubren grandes áreas metropolitanas y, por lo general, los planes de inversión destinados a ellos, por la naturaleza misma de los equipos y su cantidad, implican inversiones cuantiosas de recursos públicos, por lo que se considera que se trata de un problema de alto impacto.

En general, la responsabilidad de administrar un sistema de alumbrado público es de los gobiernos de cada ciudad o municipio, aunque en algunas situaciones, tal responsabilidad puede recaer en la empresa de distribución de electricidad local. Sin embargo, independientemente de quien sea el administrador del sistema de alumbrado, existe el problema de toma de decisión acerca de que estrategia de inversión abordar para la modernización de este, es decir, qué acciones se van a ejecutar, en qué momento y en qué lugares estratégicos.

En la Fig. 1, se muestra un esquema con la metodología que se desarrolló para realizar la planificación de inversiones en sistemas de alumbrado público. En una primera instancia, se identifican los criterios de desempeño bajo los cuales se deben seleccionar las alternativas de inversión óptimas. Para esto, inicialmente se realiza un diagnóstico del estado actual del sistema de alumbrado público, donde se clasifican las luminarias existentes según su tecnología, potencia nominal (W), flujo luminoso (lm), fotometría (cd) y se determina el consumo energético de cada tipo de luminaria (kWh/año).

Es importante aclarar que en este artículo se asume que todas las alternativas tecnológicas de inversión,  $J$ , cumplen con el diseño de iluminación existente, el cual está dado por los tipos de luminarias,  $l$ , actualmente instaladas. Es decir, la implementación de una alternativa,  $j$ , para sustituir un tipo de luminaria,  $l$ , debe mantener la fotometría y el flujo luminoso.

Se observa, además, que cada alternativa,  $j$ , corresponde a una marca de luminaria e incluso esta puede contar con tecnologías de generación distribuida (solar y/o eólica) y almacenamiento de energía (baterías) para disminuir el consumo de energía de la red de distribución de electricidad. Adicionalmente, el costo de implementación por alternativa y tipo de luminaria,  $CI_{j,l}$ , hace referencia al costo total que tiene una luminaria puesta en sitio y funcionando.

Con los datos de la potencia nominal para cada alternativa,  $j$ , sobre cada tipo de luminaria,  $l$ , se calculan los ahorros energéticos esperados  $A_{j,l}$ , que están ligados al consumo energético actual menos el consumo energético dado por la implementación de cada alternativa. El ahorro energético,  $A_{j,l}$ ,

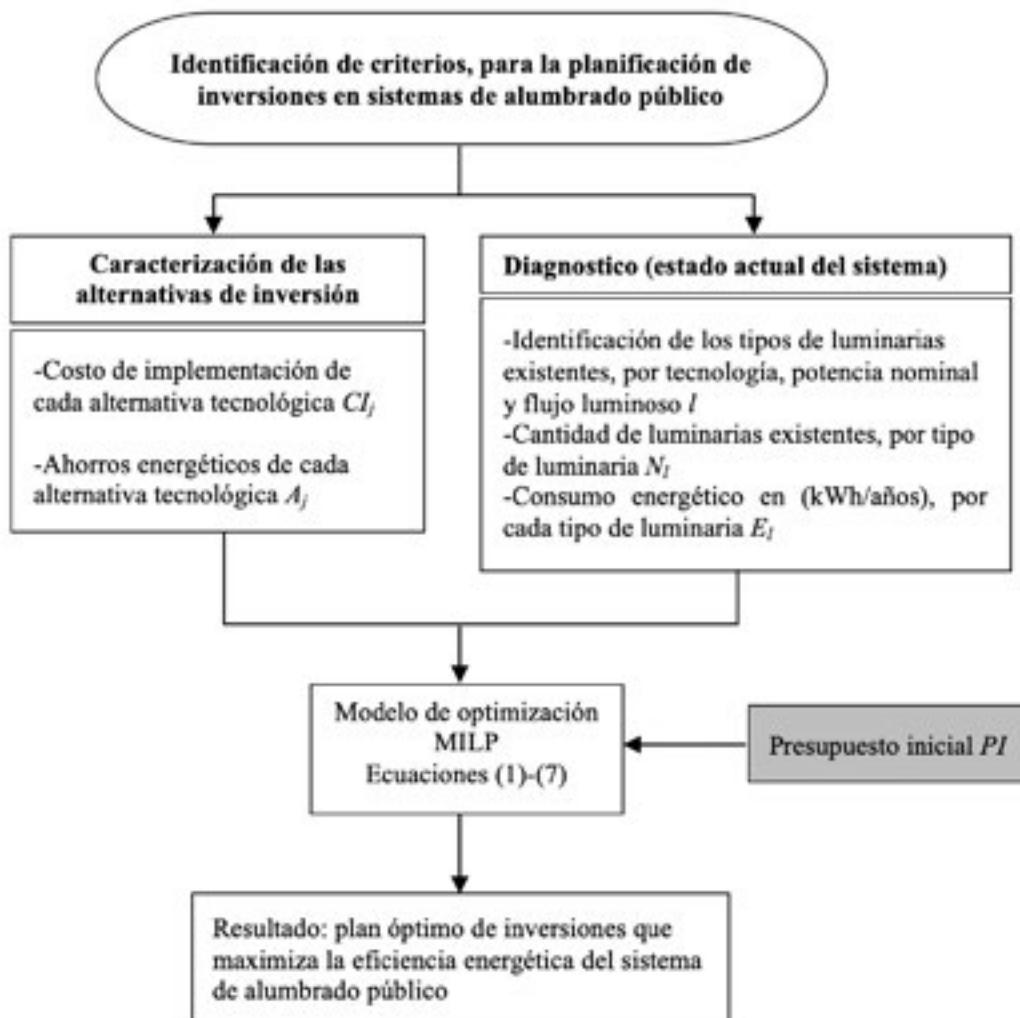


Fig 1. Esquema de la metodología desarrollada

el costo de implementación  $CI_{j,l}$  y el presupuesto inicial  $PI_t$  para cada período  $t$ , son los datos de entrada que alimentan al modelo de optimización.

Finalmente, el modelo de optimización lineal entera mixta (MILP) se encarga de evaluar las alternativas de inversión considerando un análisis multiperíodo (en este artículo, 4 años). El resultado del modelo de optimización es un listado en el que se indica el conjunto de acciones óptimas de inversión para cada período, el cual maximiza la eficiencia energética del sistema de alumbrado público, haciendo el mejor uso del presupuesto disponible para la modernización.

### 3. Formulación del problema de optimización

El modelo de optimización multiperíodo, tiene como propósito identificar la estrategia óptima de inversión indicando las acciones de modernización,  $j$ , que se deben ejecutar para cada período  $t$ , con  $t = 1, 2, \dots, T$ . Es importante

aclarar que  $X_j$  es la variable de decisión y es de naturaleza entera positiva.

$$X_j \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Las alternativas de inversión  $j$ , con  $j = 1, 2, \dots, J$ , representan las diferentes opciones que se tienen para modernizar el sistema de alumbrado público, entre las que se encuentran: realizar un cambio tecnológico pasando de luminarias de descarga a LED, instalar sistemas autónomos que incorporen luminarias LED y un KIT de panel fotovoltaico o de microturbina eólica en conjunto con una batería, implementar controladores y sensores que permitan telegestionar individualmente cada luminaria, dimerizando su flujo lumínico conforme al flujo vehicular.

Por otra parte, el ahorro energético dado por la implementación de cada alternativa de inversión tecnológica por tipo de luminaria  $A_{j,l}$ , es la diferencia entre el consumo actual de energía  $E_l$  y consumo energético esperado por la

implementación de cada alternativa tecnológica de inversión  $E_{j,l}^*$ .

$$A_{j,l} = E_l - E_{j,l}^* \quad (2)$$

Considerando lo anterior, se presenta la función objetivo que tiene como finalidad maximizar el ahorro energético, teniendo en cuenta todas las alternativas de modernización disponibles y el beneficio por los ahorros energéticos de cada opción.

$$FO = \text{Max} \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{t=1}^T X_{j,l,t} A_{j,l,t} \quad (3)$$

Se observa que (3) está sujeta a las siguientes restricciones. La primera restricción del modelo corresponde a la ecuación (4), la cual correlaciona el número de acciones aplicadas al sistema y las luminarias disponibles según su tipo, en cada periodo tras la ejecución de las acciones. Para esta restricción se deben tener en cuenta todas las alternativas  $j$ .

$$\sum_{j=1}^J X_{j,l,t} = LD_{l,t} \quad (4)$$

Se observa que en (4),  $LD_{l,t}$  depende directamente de las decisiones de implementar o no una acción de modernización en el periodo anterior. En el último caso, no implementar una acción de modernización representa la última alternativa  $j=J$ , por esta razón, esta alternativa no se tiene en cuenta a la hora de calcular las luminarias que van quedando disponibles luego de cada periodo de tiempo de optimización. Luego,  $LD_{l,t}$  se calcula como sigue:

$$LD_{l,t} = N_l - \sum_{j=1}^{J-1} X_{j,l,(t-1)} \quad (5)$$

Como segunda restricción del modelo, se observa que la sumatoria de la cantidad de acciones de modernización implementadas multiplicadas por su costo unitario, debe ser menor o igual al presupuesto total anual del período evaluado.

$$\sum_{j=1}^J CI_{j,l} X_{j,l,t} \leq PT_t \quad (6)$$

La ecuación de presupuesto está dividida en tres componentes, el primero representa el presupuesto anual inicial que se entrega a cada municipio, el segundo corresponde al residuo que proviene del presupuesto no ejecutado del periodo anterior y que se suma al presupuesto del periodo siguiente.

El tercer término está asociado al ahorro que se obtiene por mejorar la eficiencia energética del sistema, es decir el beneficio económico por el ahorro energético. Es importante

aclarar que incluir este ítem en el valor  $PT_t$ , dependerá de la visión que tenga el administrador del sistema de alumbrado público. En este artículo se asume que el administrador reinvierte lo ahorrado en acciones para modernización para el siguiente periodo.

$$PT_t = PI_t + \left( PT_{(t-1)} - \sum_{j=1}^J CI_{j,l} X_{j,l,(t-1)} \right) + \left( \sum_{j=1}^{J-1} X_{j,l,t} A_{j,l} CE \right) \quad (7)$$

#### 4. Caso de estudio

La metodología, anteriormente descrita, se aplicó a un caso real correspondiente a un municipio de Colombia. A continuación, se presentan las características del sistema de alumbrado público a analizar, cuya tecnología actual a reemplazar consiste en luminarias de sodio de alta presión (HPS).

Tabla 1. Diagnóstico del estado actual del sistema de alumbrado público

Estado actual del sistema					
Tipo de luminaria	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$
Tecnología	HPS	HPS	HPS	HPS	HPS
Potencia nominal (W)	400	250	150	100	70
Eficiencia (lumen/W)	128	105	90	82	65
Cantidad de luminarias	11	157	479	93	1617

Para el análisis se consideraron ocho alternativas de decisión. Las primeras seis alternativas tecnológicas de inversión,  $j=1, 2, \dots, 6$ , representan el cambio de tecnología de luminarias HPS a luminarias LED de diferentes fabricantes (marcas). Esto ya que en el mercado se encuentra diversidad de precios y prestaciones técnicas, variando la eficiencia energética según el fabricante.

La alternativa  $j=7$  representa la instalación de sistemas autónomos con luminarias LED que incorporan un controlador, un panel fotovoltaico y una batería. Finalmente, la alternativa  $j=8$  se reservó para la acción de no invertir.

Para determinar el ahorro energético de cada alternativa, se observó que el alumbrado público del municipio se enciende por medio de fotocontroles instalados en cada luminaria. En promedio el uso de cada luminaria por día es de 13 horas, para los 365 días del año. Con este dato se obtuvo el consumo de energía actual del sistema, siendo este igual a  $E_l = 1,22$  GWh/año. A partir de esto y con base a las alternativas,  $j$ , por tipo de luminaria,  $l$ , se procedió al cálculo del ahorro energético,  $A_{j,l}$  percibido por realizar un cambio uno a uno por luminarias más eficientes. Adicionalmente, cada alternativa  $j$  tiene un costo de implementación asociado,  $CI_{j,l}$ , el cual se reporta en la Tabla 3.

Tabla 2. Ahorro energético expresado en kW/año dado por la implementación de alternativas tecnológicas

	LED <i>j</i> <sub>1</sub>	LED <i>j</i> <sub>2</sub>	LED <i>j</i> <sub>3</sub>	LED <i>j</i> <sub>4</sub>	LED <i>j</i> <sub>5</sub>	LED <i>j</i> <sub>6</sub>	LED+PV <i>j</i> <sub>7</sub>
<i>I</i> <sub>1</sub>	1.145	1.152,96	1.144,54	1.143,42	1.138,19	1.151,84	2.246,4
<i>I</i> <sub>2</sub>	618,3	645,28	563,28	610,46	637,98	650,33	1404
<i>I</i> <sub>3</sub>	272,2	283,61	331,96	277,99	281,64	266,76	842,4
<i>I</i> <sub>4</sub>	197,1	255,86	307,20	215,32	254,29	242,61	561,6
<i>I</i> <sub>5</sub>	194	204,93	219,02	167,13	200,49	183,64	393,12

Tabla 3. Costo de implementación en USD, por alternativa tecnológica de inversión

	LED <i>j</i> <sub>1</sub>	LED <i>j</i> <sub>2</sub>	LED <i>j</i> <sub>3</sub>	LED <i>j</i> <sub>4</sub>	LED <i>j</i> <sub>5</sub>	LED <i>j</i> <sub>6</sub>	LED+PV <i>j</i> <sub>7</sub>
<i>I</i> <sub>1</sub>	1.254	1.129	1.187	1.362	1.245	1.136	5.966
<i>I</i> <sub>2</sub>	1.098	924	873	1.023	967	878	4.389
<i>I</i> <sub>3</sub>	853	837	820	997	886	810	3.713
<i>I</i> <sub>4</sub>	746	658	786	925	749	781	2.985
<i>I</i> <sub>5</sub>	667	656	739	873	721	762	2.042

Se plantearon cuatro escenarios de evaluación, en los que se consideró la combinación de la variación del costo de la energía y del presupuesto inicial, para un periodo de planificación de 4 años. Respecto del costo de la energía,  $CE$ , se consideraron 0,17 USD/kWh y 0,46 USD/kWh, los que corresponden al costo de la prestación de servicio de energía eléctrica en una zona interconectada, como Bogotá [12], y otra no interconectada [13], respectivamente. Respecto del presupuesto inicial para cada periodo,  $PI_t$ , se fijaron dos valores, 160.000USD (que corresponden al 9,54% de capital requerido para poder modernizar completamente el sistema de alumbrado público evaluado) y 320.000 USD anuales (asumiendo una política de inversión intensiva). Luego, los tres primeros escenarios se han optimizado con el modelo MILP propuesto, maximizando el ahorro energético, mientras que el cuarto escenario se realizó de forma intuitiva, es decir sin optimizar, tomando como criterio de decisión realizar la mayor cantidad de cambios de luminarias en el menor tiempo posible y seleccionando las alternativas más económicas. En resumen, los escenarios evaluados son:

- ESC1:  $CE=0,17$  USD/kWh,  $PI_t=160.000$  USD y optimizado,
- ESC2:  $CE=0,17$  USD/kWh,  $PI_t=320.000$  USD y optimizado,
- ESC3:  $CE=0,46$  USD/kWh,  $PI_t=320.000$  USD y optimizado,

- ESC4:  $CE=0,17$  USD/kWh,  $PI_t=320.000$  USD y no-optimizado.

## 5. Análisis de resultados

El siguiente análisis se basa en los resultados reportados en la Tabla 4-5 y en la Fig 2. Esta información se obtuvo a partir del modelo de optimización MILP aplicado a la planificación multiperíodo de inversiones en el sistema de alumbrado público, el cual se programó haciendo uso del software GAMS, para los primeros tres escenarios. El cuarto escenario consiste en adquirir la mayor cantidad de luminarias de la marca más económica, utilizando el presupuesto total disponible por período. Además, en la Tabla 4 se reportan el ahorro energético total, el capital total invertido para la modernización de las luminarias,  $CTI$ , y el porcentaje de luminarias cambiadas en el sistema, durante los cuatro años simulados.

De comparar los ESC1 y ESC2, mismo costo de energía y diferentes presupuestos, se observa un notable incremento en el cambio de luminarias del tipo  $l_5$  y marca  $j_2$  motivado claramente por la mayor disponibilidad de presupuesto en el ESC2. Esto conduce además a un mayor ahorro energético y a un mayor porcentaje de sustitución de luminarias en todo el parque administrado, pasando de 39% en ESC1 a 85% en ESC2.

De comparar los ESC2 y ESC3, diferente costo de energía y mismo presupuesto, se observa un incremento en el capital total invertido,  $CTI$ , de 302.230 USD. Tal incremento resulta del mayor incentivo al ahorro energético dado por el mayor costo de la energía para el ESC3. De hecho, el ESC3 fue el único que condujo a un reemplazo del 100% de las luminarias (2357 equipos) e incluyó la adopción de luminarias con capacidad de generación fotovoltaica en pro de reducir la demanda de electricidad de la red de distribución.

De la comparación del el ESC2 y el ESC4, es decir, escenario optimizado contra intuitivo, se observa la importancia de realizar el proceso de optimización, ya que, bajo las mismas condiciones de presupuesto y costo de energía, se logra un ahorro mucho mayor para el ESC2, de hecho 0,41 GWh más de ahorro respecto del ESC4. A pesar de que el ESC2 optimizado, logra cambiar un 1% menos de luminarias que el escenario ESC4, el hecho de un mayor ahorro energético implica una mejor toma de decisiones resultantes del problema de optimización, sin importar la cantidad de luminarias sino la necesidad de incrementar la eficiencia energética del sistema de alumbrado público.

Finalmente, y para concluir el análisis, a partir del modelo de optimización MILP se calculó el presupuesto inicial requerido,  $PI_t$ , para cambiar la totalidad del parque de luminarias en el periodo de cuatro años, considerando los dos valores de costo de la energía, es decir, 0,17 USD/kWh y 0,46 USD/kWh. Como resultado se obtuvieron presupuestos iniciales de 374.530 USD y de 307.000 USD respectivamente. Es decir, para un caso en que el costo de la energía es 0,17

USD/kWh se requiere un presupuesto anual de 374.530 USD para lograr la sustitución del 100 de las luminarias. Para el caso de 0,46 USD/kWh se requiere un presupuesto menor de 307.000 USD ya que el recupero económico por ahorro de energía es mayor y posibilita hacer mayores inversiones de capital en luminarias.

Tabla 4. Plan de inversiones para los cuatro escenarios planteados por periodo

	$j_2, l_1$	$j_2, l_4$	$j_2, l_5$	$j_3, l_3$	$j_3, l_4$	$j_3, l_5$	$J_6, l_2$	$j_7, l_5$
ESC 1	$t_1$	11	0	0	10	2	0	157
	$t_2$	0	1	0	219	0	0	0
	$t_3$	0	0	0	235	0	0	0
	$t_4$	0	0	186	15	90	1	0
	<b>total</b>	11	1	186	479	92	1	157
ESC 2	$t_1$	11	0	0	207	0	0	0
	$t_2$	0	0	83	272	93	1	0
	$t_3$	0	0	568	0	0	2	0
	$t_4$	0	0	601	0	0	0	157
	<b>total</b>	11	0	1.252	479	93	3	157
ESC 3	$t_1$	11	0	0	207	0	0	0
	$t_2$	0	0	163	272	93	2	0
	$t_3$	0	0	720	0	0	3	0
	$t_4$	0	0	3	0	0	723	157
	<b>total</b>	11	0	886	479	93	728	157
ESC 4	$t_1$	0	0	487	0	0	0	0
	$t_2$	0	0	514	0	0	0	0
	$t_3$	0	0	541	0	0	0	0
	$t_4$	0	93	75	321	0	0	0
	<b>total</b>	0	93	1.617	321	0	0	0

Tabla 5. Resultados esperados por la implementación de los planes de inversiones presentados en la Tabla4.

	<i>CTI</i> [USD]	<i>A</i> [GWh]	<i>PT*</i> [USD]	%N
ESC1	$t_1$	160.000	0,12	160.000
	$t_2$	180.150	0,19	180.180
	$t_3$	192.610	0,27	192.620
	$t_4$	205.840	0,34	205.860
	<b>total</b>	738.600	0,92	738.660
ESC2	$t_1$	319.890	0,18	320.000
	$t_2$	351.250	0,32	351.310
	$t_3$	374.170	0,44	374.380
	$t_4$	394.340	0,56	394.410
	<b>total</b>	1.439.650	1,50	1.440.100
ESC3	$t_1$	319.890	0,18	320.000
	$t_2$	404.490	0,34	404.520
	$t_3$	474.640	0,48	474.690
	$t_4$	542.860	0,64	542.880
	<b>total</b>	1.741.880	1,64	1.742.090
ESC4	$t_1$	319.539	0,10	320.000
	$t_2$	337.254	0,21	337.428
	$t_3$	354.969	0,32	355.047
	$t_4$	373.565	0,46	373.797
	<b>total</b>	1.385.327	1,09	1.386.272

\*PT se calcula según la ecuación (7)

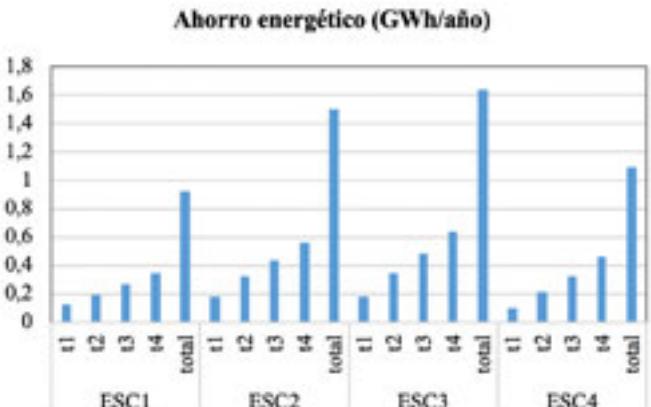


Fig 2. Ahorro energético obtenido para los escenarios evaluados

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

A partir de este trabajo se puede concluir la importancia que tiene la planificación multiperíodo para la toma de decisiones de cambio de tecnología en el sistema de alumbrado público, ya que permite lograr mayores ahorros energéticos, mismo que pueden ser reinvertidos para acelerar el recambio de tecnología. El proceso de optimización conduce a una optimización de uso de los recursos públicos y a acelerar el objetivo común de incrementar la eficiencia energética, para a su vez ayudar a mitigar los impactos sobre el medio ambiente.

De los análisis realizados, se observó que el costo de energía eléctrica juega un papel fundamental en la planificación de alumbrado público, ya que este parámetro impulsa o frena alternativas según su eficiencia energética y su costo de implementación. Entre mayor sea el costo de la energía, *CE*, más se favorece a la adopción de alternativas de mayor ahorro energético, como es el caso de luminarias con sistemas de generación distribuida, esto último a pesar del elevado costo de este tipo de sistema.

Cabe resaltar que, en el estado del arte, hasta el momento no se ha realizado una investigación que considere optimización multiobjetivo y multiperíodo. Razón por la cual, un trabajo futuro puede considerar, además de maximizar el ahorro de energía, otros objetivos como minimizar la polución lumínica, maximizar el índice de reproducción de color, los índices de seguridad, entre otros. Adicionalmente, se puede contemplar para la toma de decisión y priorización de la inversión, aspectos relacionados con la tasa de fallas, el grado de envejecimiento, etc, de las luminarias existentes en el sistema.

## 7. Referencias

- [1] T. Summary, “Special Report on Global Warming of 1.5°C Technical Summary,” *Intergov. Panel Clim. Chang.*, (2018).
- [2] IEA Publications, “Market Report Series energy efficiency 2018 Market Report Series energy efficiency 2018,” (2018).
- [3] Ministry of Mines and Energy, “Action Plan Indicative of Energy Efficiency 2017-2022,” p. 14, (2016).

- [4] “Governor Cuomo Announces Smart Street Lighting NY Program for all Municipalities Across the State | Governor Andrew M. Cuomo,”2018, <https://www.governor.ny.gov/news/governor-cuomo-announces-smart-street-lighting-ny-program-all-municipalities-across-state>. Último acceso: 07/08/19.
- [5] Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,“Iluminación LED en todas las calles \_ Buenos Aires Ciudad - Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,” 2019, <https://www.buenosaires.gob.ar/compromisos/iluminacion-led-en-todas-las-calles>. último acceso: 18/08/19.
- [6] K. Estupiñán, “Alcaldía Peñalosa entregó 80.000 luminarias LED que modernizan el alumbrado público de Bogotá,” 2019, <https://bogota.gov.co/asi-vamos/alcaldia-instala-80000-luminarias-led-en-bogota>. Último acceso: 20/08/19.
- [7] H. Samani, J. Koh, E. Saadatian, and D. Polydorou, “Intelligent Information and Database Systems,” vol. 7197, pp. 158–165, (2012).
- [8] A. Gil-De-Castro, A. Moreno-Munoz, A. Larsson, J. J. G. De La Rosa, and M. H. J. Bollen, “LED street lighting: A power quality comparison among streetlight technologies,” *Light. Res. Technol.*, vol. 45, no. 6, pp. 710–728, (2013).
- [9] I. Wojnicki and L. Kotulski, “Improving control efficiency of dynamic street lighting by utilizing the dual graph grammar concept,” *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 1–15, (2018).
- [10] R. Carli, M. Dotoli, and R. Pellegrino, “A decision-making tool for energy efficiency optimization of street lighting,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 96, pp. 223–235, (2018).
- [11] R. Carli, M. Dotoli, and R. Pellegrino, “A Multi-Period Approach for the Optimal Energy Retrofit Planning of Street Lighting Systems,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 5, p. 1025, (2019).
- [12] N. A. García, R. H. T. Holguín, and D. A. O. Urrea, *Diagnóstico De La Prestación Del Servicio De Energía Eléctrica*. (2018).
- [13] ENEL codensa, “Tarifario-junio-2019ENEL.pdf,” 2019, <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-codensa.html>. Último acceso: 07/08/19.

## 5. Biografías



**Cristhian C. Rodríguez J.** nació en Bogotá Colombia en 1994. Obtuvo el grado de Ingeniero electricista en la Universidad Nacional de Colombia en 2017. Participó en proyectos de investigación relacionados con la iluminación y compatibilidad electromagnética en la Universidad Nacional de Colombia desde 2014 hasta 2017. Trabajó como profesional junior en Enel-Colombia durante 2017-2018. En 2018 ganó la beca DAAD, con la que actualmente adelanta estudios de maestría en ingeniería eléctrica en la Universidad

Nacional de San Juan Argentina.



**Andrés Romero** Recibió el grado de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia, en 2002, y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica de la UNSJ, en 2009. Actualmente es profesor e investigador del IEE UNSJ-CONICET. Sus áreas de interés abarcan la gestión de activos en redes eléctricas y calidad de energía.



**Gastón O. Suvire** nació en San Juan Argentina en 1977. Se graduó como Ingeniero Eléctrico de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en 2002. Obtuvo el Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la misma universidad en 2009, realizando parte del mismo en el Instituto COPPE de la Universidad Federal de Rio de Janeiro en Brasil. Realizó una estancia de investigación postdoctoral dentro del "Programa Visiting Fulbright Scholar" entre CONICET y la Comisión Fulbright, en el Pacific

Northwest National Laboratory (PNNL) del Departamento de Energía de Estados Unidos. El Dr. Suvire es actualmente profesor en la Facultad de Ingeniería de la UNSJ, investigador del CONICET y consultor del IEE, UNSJ-CONICET. Ha participado en muchos proyectos de investigación nacionales e internacionales y en consultoría de alto nivel con la industria. Es autor o coautor de cerca de 40 publicaciones en sus campos de investigación, incluidos conferencias y revistas de ISI/SCOPUS, libros y capítulos de libros.

# Evolución del alumbrado público en la ciudad de Rosario

Fernando Deco<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Dirección General de Alumbrado Público

<sup>a</sup>[ferdeco@gmail.com](mailto:ferdeco@gmail.com)

**Resumen**—Se presentan las acciones políticas y técnicas que se implementaron en la ciudad de Rosario, desde la creación de la Dirección de Alumbrado Público en el año 1990.

Una gestión continua que llega a los 30 años de su implementación, encuentra a la ciudad de Rosario con más de 90.000 luminarias, siendo el segundo parque lumínico de Argentina, con un inventario total de las instalaciones con relevamiento de 41 datos por luminaire, la implementación de telegestión que unida a las inspecciones propias arroja un índice de apagado menor al 1%.

La medición diaria del índice de apagado y el control por telegestión, no puede ser posible si no se acompaña del personal capacitado para tal fin, éste ha sido el primer paso que se tomó para la gestión continua hacia la calidad del servicio.

Se une a toda esta implementación, la gestión de reclamos que es de fundamental importancia para la satisfacción ciudadana, que es en definitiva quien recibe y evalúa a la iluminación vial.

*Palabras clave.* Telegestión, mantenimiento, alumbrado público

**Abstract.**- The political and technical actions that were implemented in the city of Rosario are presented, since the creation of the Public Lighting Directorate in 1990.

A continuous management that reaches 30 years of its implementation, finds the city of Rosario with more than 90,000 luminaires, being the second light park in Argentina, with a total inventory of the facilities with survey of 41 data per luminaire, the implementation telemangement that together with its own inspections shows a shut down rate of less than 1%

The daily measurement of the shut down index and the control by remote management cannot be possible if it is not accompanied by trained personnel for this purpose, this has been the first step taken for the continuous management towards the quality of the service.

It joins all this implementation, the management of claims that is of fundamental importance for citizen satisfaction, which is ultimately who receives and evaluates road lighting.

*Key Words.* Telegestión, maintenance, Street lighting

## 1. Introducción

En este trabajo se presentan las distintas acciones técnicas y políticas que fueron validadas por los resultados obtenidos y también, los inconvenientes que generan las nuevas tecnologías al mantenimiento del alumbrado público.

Se detallarán los conceptos fundamentales de la implementación de las nuevas tecnologías LED unida al telecontrol y su aporte al mantenimiento que no es uno de sus puntos fuertes y además, como el sistema de reclamos proporcionado a los vecinos de la ciudad, también puede

ocasionar problemas en lugar de beneficios, cuando no se implementa con los conceptos del mantenimiento.

Llegando a los 30 años de una gestión sostenida, la experiencia adquirida en la gestión del mantenimiento de la iluminación pública en la ciudad de Rosario, puede servir como base a otras ciudades para organizar este servicio público que se asocia muchas veces a la seguridad ciudadana y al disfrute de la ciudad por la noche.

Se describirán además, los indicadores que se han establecido para la observancia del mantenimiento que en la ciudad de Rosario, se encuentra concesionado a empresas, pero el control de la gestión está a cargo del municipio.

## 2. Primeros pasos

El primer paso importante fue la creación de la Dirección General de Alumbrado Público, el 5 de diciembre de 1990, una decisión político que marcó el camino de interpretar que la iluminación pública es un servicio público que debe garantizar el municipio.

La decisión de crear este Ente de control posibilitó contar con las siguientes ventajas, presupuesto propio y personal cualificado para la gestión.

Se toma la decisión de realizar el relevamiento completo de la ciudad para saber cómo está compuesto el parque lumínico. Este relevamiento que se realizó de noche, no sólo posibilitó relevar las instalaciones existentes, sino que además, se registraron aquellas zonas en que se debía reforzar la iluminación, las zonas que carecían de la misma y detectar las instalaciones que no funcionaban.

Se toma la decisión de que el servicio de mantenimiento del alumbrado público va a ser concesionado a empresas privadas, pero la gestión y el control quedaba en manos de la municipalidad. Se crea para tal fin la Dirección de Fiscalización del Mantenimiento. Esta Dirección cuenta con inspectores diurnos, nocturnos y feriantes, se establece una atención telefónica de reclamos, de 24 horas todos los días.

## 3. Período 1998 – 2003

En éste período se trata de mejorar la atención a los reclamos que formula la ciudadanía por lo cual se toman las siguientes acciones:

- Se dispone de una línea telefónica gratuita para los reclamos de la ciudadanía, línea 0800
- Se diseña un software para que asigne la zona correspondiente a cada concesionario de los llamados recibidos, de manera que no se produzcan errores de asignación a la atención.
- Se toma la decisión, quizás la más importante, que es la capacitación del personal de alumbrado público, tanto en instituciones externas como la capacitación interna impartida por los profesionales que integran la Dirección de Fiscalización.
- En diciembre del año 2003 se pone en funcionamiento para la recepción de reclamos el sistema informático denominado SIRAP, de desarrollo propio. Este contiene el inventario de las instalaciones georeferenciadas, de manera que se automatizó el ingreso de reclamos y sin errores del operador, ya que sólo se admite una falla sobre algo inventariado y presentado en el mapa de georeferenciación, de esta manera se hace imposible un reclamo erróneo.

En la figura 1 se muestra el esquema de este software y en la figuras 2 y 3 algunas de sus pantallas:

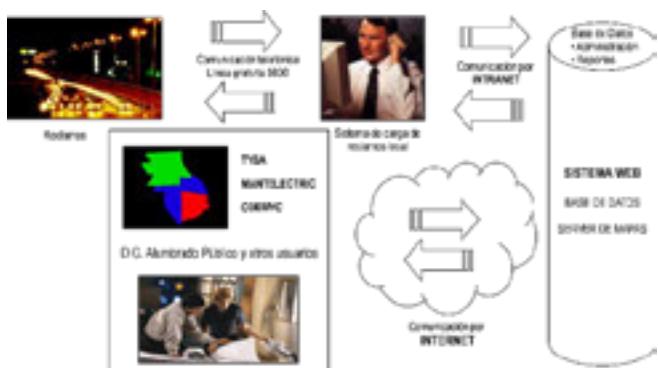


Fig 1. Esquema de funcionamiento del SIRAP



Fig 2. Pantalla de visualización del inventario georeferenciado

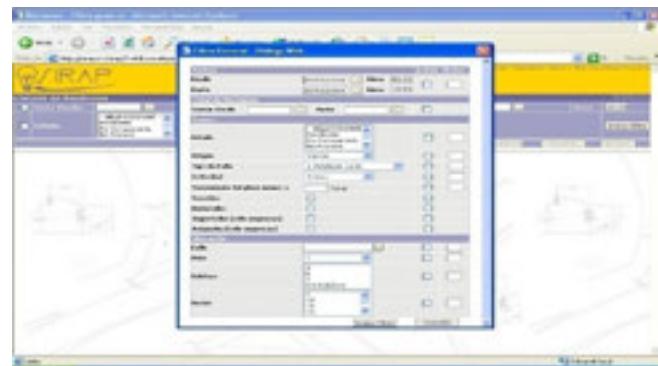


Fig 3. Pantalla de búsqueda de información

#### 4. Programas establecidos a partir del 2003

- Programa de mitigación del riesgo eléctrico: Este programa establece las acciones que se deben efectuar sobre las instalaciones de alumbrado público con el fin de minimizar el riesgo eléctrico a las personas y animales. Este consiste en la medición, corrección e instalación de las puestas a tierra de todas las columnas. La instalación de interruptores diferenciales en los tableros de comando y la señalización de riesgo eléctrico en todas las columnas y tablero del alumbrado público.
- Programa de la medición de la calidad del servicio: se establece un límite de control, por cada zona en que se dividió la ciudad, del porcentaje de lámparas apagadas toleradas, de superarse este límite se aplica una sanción al concesionario. Para su implementación se dividió la ciudad en 23 subzonas de las cuales nuestra inspección nocturna las pudiera recorrer en una noche, la cantidad relajada se computa con la cantidad de lámparas instaladas en dicha subzona y se establece el índice de apagado. En la actualidad el índice de apagado de la ciudad no supera el 1%. En la figura 4 se observa una subzona de la ciudad y el recorrido de la inspección nocturna.

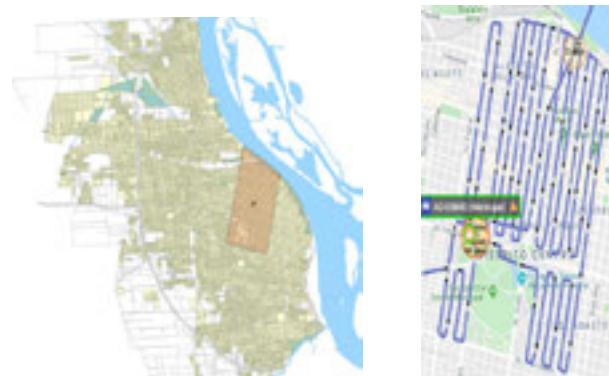


Fig 4. Subzona y recorrido de inspección

- Programa de disposición controlada de residuos: Este programa establece el resguardo de las lámparas de descarga que se desechan por fin de su vida y que son cambiadas por los concesionarios, esto permite controlar el mercurio. Se capacita al personal de los concesionarios y se establece la separación de vidrio, metal y tubo de descarga. Los tubos de descarga que son los que contienen mercurio se colocan en recipientes adecuados y una vez llenos, son depositados en sitios especiales para desechos peligrosos. De esta manera las lámparas no son arrojadas a los residuos domiciliarios. En la figura 5 se observan los recipientes de separación.



Fig 5. Recipientes de separación de componentes de lámparas

Con ésta acción en 10 años de implementación se pudo disponer en rellenos para sustancias peligrosas de 3,8 kg de mercurio. De ésta manera se cuida el medio ambiente.

En abril de 2015 se toma la decisión política de implementar un sistema único de reclamos denominado SUA y con una línea gratuita 147. Se deja de utilizar el SIRAP y se pasa al SUA. En la figura 6 se observa una pantalla de este software desarrollado por la municipalidad de Rosario.

Fig 6. Pantalla del sistema SUA

Se puede observar en la figura 6, la diversidad de filtros que se tienen para la localización de un reclamo y poder seguir su evolución.

## 5. Año 2016, comienzo de la telegestión

En el año 2016 con el ingreso del led en la iluminación pública de la ciudad de Rosario, se adopta el sistema con telegestión. Esto permite el monitoreo de los servicios y otros datos de las luminarias.

En la figura 7 se observa las funcionalidades que brinda el sistema de telegestión de la iluminación pública.



Fig 7. Principales acciones y datos de telegestión

Una de las ventajas que brida el sistema de telegestión para el ahorro de energía, es la dimerización, ésta se puede realizar cuando la situación de tránsito y seguridad lo permitan. En la figura 8 se observa una ilustración de dimerización utilizada en la iluminación pública de la ciudad de Rosario y el ahorro energético que se logra.

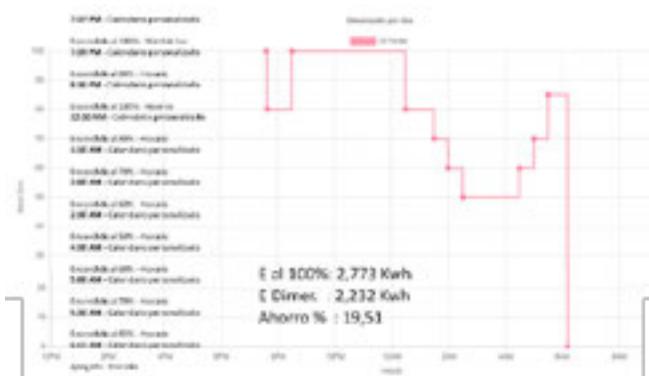


Fig 8. Esquema de dimerización

Como se puede observar en la figura anterior, la dimerización tanto para bajar el nivel como para subirlo, se realiza en escalones de manera que no se produce un brusco aumento o descenso del nivel de iluminación. Esto hace aceptable la metodología por la ciudadanía ya que la han aceptado sin inconvenientes.

En la figura 9 vemos una pantalla de dimerización de un sistema diferente al de la figura 8, pero con los mismos conceptos.

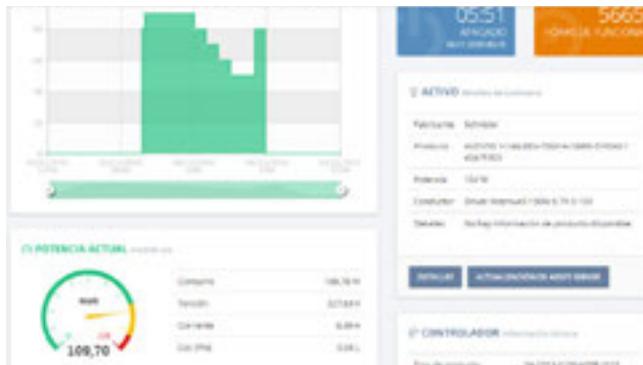


Fig 9. Esquema de dimerización

Uno de los inconvenientes del sistema de telegestión es la detección de fallas que corresponden a sobre y baja tensión. Estas fallas no corresponden al sistema de alumbrado público, sino a la empresa proveedora de energía. Los niveles de tensión en Rosario no son estables durante las noches, presentando variaciones diversas y el sistema la detecta como falla y envía la alarma, que constituye una alarma falsa para el sistema de iluminación.

Este inconveniente como así también, la salida de servicio de los nodos es un motivo que los sistemas de telegestión no manejan de forma eficiente las alarmas como para fijarse de las mismas. Este punto es quizás el que tengan que mejorar los sistemas de telegestión para utilidad de la gestión del mantenimiento.

## 6. Últimos desarrollos

En este año 2020, se han desarrollado dos indicadores para la gestión del mantenimiento del alumbrado público.

### Tiempo de respuesta a reclamos (TRR)

Este indicador trata de evaluar el tiempo que tarda un reclamo, que se recibe por el Sistema Único de Reclamos (SUA-147), tratando que los mismos cumplan con el objetivo que se detalla a continuación.

#### Premisas: Resolución de reclamos

Mas del 70% de los reclamos recibidos resueltos antes de las 24 horas

Mas del 90% de los reclamos recibidos resueltos antes de las 36 horas

Mas del 98% de los reclamos recibidos resueltos antes de las 48 horas

El indicador se puso en ejecución a partir del mes de agosto 2020, luego de 7 meses de estudio.

### Índice de reclamantes sobre el alumbrado público

Este indicador trata de parametrizar la cantidad de llamados recibos que formulan la ciudadanía, referenciando los mismos a la cantidad de lámparas de la ciudad.

De esta manera será factible comparar el nivel de llamados con otras ciudades del país o del exterior, para evaluar la cantidad de quejas sobre el servicio y ver si es el adecuado o bien es excesivo y se deben tomar medidas al respecto.

## 7. Evolución de los indicadores en agosto 2020

Como ejemplo del uso de estos indicadores para la gestión del mantenimiento del alumbrado público, presento a continuación el resultado que arrojaron los mismos para el mes de agosto del presente año.

**Índice de apagado:** Este valor que se obtiene diariamente en función de nuestra inspección nocturna, que verifica si el índice diario supera el límite superior de control (LSC) establecido en el pliego. En la tabla 1 siguiente se observa cómo se desarrolló en el mes de estudio.

Tabla 1. Valores del índice de apagado

Día	Sub-zona	LSC	Índice	Superó LSC	Descuento
28-agosto	<b>1A</b>	1,05	0,74	-0,31	<b>NO</b>
	<b>1B</b>	1,51			
15-agosto	<b>1C</b>	2,07	0,44	-1,63	<b>NO</b>
28-agosto	<b>1D</b>	2,24	1,38	-0,86	<b>NO</b>
05-agosto	<b>1E</b>	1,09	0,73	-0,36	<b>NO</b>
05-agosto	<b>1F</b>	1,13	0,33	-0,80	<b>NO</b>
21-agosto	<b>1J</b>	1,74	0,19	-1,55	<b>NO</b>
	<b>1K</b>	1,42			
19-agosto	<b>1L</b>	1,32	0,39	-0,93	<b>NO</b>
04-agosto	<b>1M</b>	1,21	0,35	-0,86	<b>NO</b>
07-agosto	<b>2A</b>	2,65	0,83	-1,82	<b>NO</b>
24-agosto	<b>2B</b>	2,61	0,68	-1,93	<b>NO</b>
04-agosto	<b>2C</b>	2,97	1,97	-1,00	<b>NO</b>
10-agosto	<b>2D</b>	2,70	1,48	-1,22	<b>NO</b>
18-agosto	<b>2E</b>	0,92	0,12	-0,80	<b>NO</b>
19-agosto	<b>2F</b>	0,89	0,19	-0,70	<b>NO</b>
03-agosto	<b>2I</b>	0,81	0,19	-0,62	<b>NO</b>
19-agosto	<b>3A</b>	1,69	0,50	-1,19	<b>NO</b>
10-agosto	<b>3B</b>	0,99	0,44	-0,55	<b>NO</b>
18-agosto	<b>3C</b>	0,86	0,36	-0,50	<b>NO</b>
	<b>3D</b>	1,80			
14-agosto	<b>3E</b>	1,77	0,31	-1,46	<b>NO</b>
04-agosto	<b>3F</b>	1,34	0,33	-1,01	<b>NO</b>

**Tiempo de respuesta a reclamos (TTR):** Este indicador establece los tiempos de reparación a los reclamos que son recibidos por el 147.

El resultado en el mes de estudio es el que se presenta en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Valores del TTR

Agosto			
	< 24:00:00	< 36:00:00	< 48:00:00
ZONA 1	93,49	97,98	99,84
ZONA 2	94,99	98,49	99,30
ZONA 3	74,80	93,21	95,51

Índice de reclamos sobre alumbrado público: Este valor se muestra en la figura 10, donde se observa un solo desplazamiento del valor establecido como normal (línea roja), y se debe a lluvia.



Fig 10. Índice de reclamos

Otro desarrollo importante es la implementación de realizar reclamos por telefonía celular y además, por el mismo sistema, los concesionarios responden sus reparaciones.

De esta manera, la reparación efectuada se informa en el momento de realizarla y se acompaña de una foto de dicha reparación. De esta manera queda fehacientemente registrada la reparación y a su vez, esta información le llega al solicitante a su teléfono o email que haya registrado al realizar el reclamo.

Este desarrollo se denominó Sua Móbil y se puede controlar por el software de Monitoreo de Atención y Gestión Operativa.

En el mismo figuran la cantidad de reparaciones que se está realizando en la ciudad, en tiempo real y georeferenciada. Aquellas que han sido reparadas cuentan con la foto correspondiente que comprueba la acción realizada.

En la figura 11 se muestra una pantalla de esta aplicación.

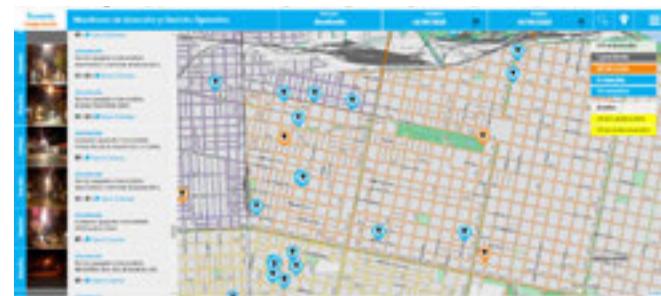


Fig 11. Monitoreo en tiempo real de reclamos

## 8. Conclusiones

Como se puede observar, desde el nacimiento de la Dirección General de Alumbrado Público, próxima a cumplir 30 años, siguió un plan constante hacia la calidad del servicio en lo que respecta al mantenimiento.

El mantenimiento de la iluminación pública es fundamental para garantizar la continuidad del servicio de las instalaciones quienes forman parte de la sensación de seguridad que experimenta la ciudadanía y posibilita el disfrute nocturno.

Se puede observar también por lo expresado, que la implementación de un sistema de gestión de reclamos unido al inventario georeferenciado y a la implementación de indicadores del funcionamiento del servicio es adecuado y los responsables de los municipios debieran atender este servicio público con la calidad que se merece.

Queda demostrado que la implementación de softwares realizados desde el punto de vista de su utilidad para el mantenimiento y seguimiento de reclamos y reparaciones es el más adecuado y se independiza de la información de fallas que indican los sistemas de telegestión.

Los indicadores desarrollados en la municipalidad de Rosario han sufrido un análisis pormenorizado y prueba de campo antes de sus implementaciones y se demuestra que se puede llevar adelante con un esquema de inspecciones nocturnas y software desarrollados para manejar la información.

# Evaluación de la metodología de diseño de iluminación para túneles ópticamente largos con velocidades de transito reducidas

Angelica Vargas Chavarro<sup>1,a</sup>, Mauricio Polanco González<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, <sup>a</sup>[anvargasch@unal.edu.co](mailto:anvargasch@unal.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, <sup>b</sup>[bmpolancog@unal.edu.co](mailto:bmpolancog@unal.edu.co)

**Resumen.** - La experiencia de hacer diseños de iluminación para túneles de carretera conforme a la publicación normativa CIE 88:2004, ha encaminado los aspectos del cálculo hacia criterios de solución para encontrar un valor adecuado de luminancia en la zona umbral ( $L_{th}$ ); sin embargo, a velocidades bajas de circulación, determinan distancias de parada (SD) bastante cortas para el observador, por tanto, el porcentaje ( $\tau$ ) visible del portal de entrada se convierte en el más relevante. Este trabajo consistió en describir las dos metodologías usadas para el cálculo de iluminación de la zona umbral, comparar los métodos relacionando su campo visual y la distancia de parada en relación a un modelo geométrico de túnel dentro del contexto colombiano, evaluando su aplicabilidad para túneles ópticamente largos con distancias de parada cortas, obteniendo rangos de recomendación para cada método dependiendo de la velocidad de circulación permitida, encontrando que el método L20 no está orientado a aplicaciones de diseño para túneles con velocidades inferiores a 60 km/h.

**Palabras clave.** Diseño de iluminación de Túneles, Método L20, Método de contraste percibido, CIE 88, Campo visual.

**Abstract.** - The experience of making lighting designs for road tunnels, according to the normative publication CIE 88: 2004, has directed the aspects of the calculation towards solution criteria to find an adequate value of luminance in the threshold zone ( $L_{th}$ ); However, at low traffic speeds, they determine relatively short stopping distances (SD) for the observer; therefore, the visible percentage ( $\tau$ ) of the entrance portal becomes the most relevant. This work consisted of describing the two methodologies used to calculate the illumination of the threshold zone, comparing the methods relating its visual field and the stopping distance concerning a geometric tunnel model within the Colombian context, evaluating its applicability for tunnels optically long with short stopping distances; obtaining recommendation ranges for each method depending on the allowed speed of movement, finding that the L20 method is not oriented to design applications for tunnels with speeds lower than 60 km/h.

**Key Words.** Tunnel lighting design, L20 method, Perceived contrast method, CIE 88, Visual field.

## 1. Introducción

La guía de diseño CIE 088 del 2004, documento de mayor aplicabilidad para la iluminación de túneles y pasos a desnivel de carreteras, considera distintos factores para determinar la iluminación diurna de túneles ópticamente largos, buscando medidas para adaptar el observador a la variación entre la iluminación exterior e interior en el ingreso del conductor al túnel.

Algunos túneles y pasos subterráneos, donde los conductores no pueden ver la salida frente al túnel a la distancia SD, necesitan tener iluminación en la zona umbral en horarios diurnos, incluso si su longitud aparenta un túnel corto, esto es considerado por la guía de la CIE como un túnel ópticamente largo.

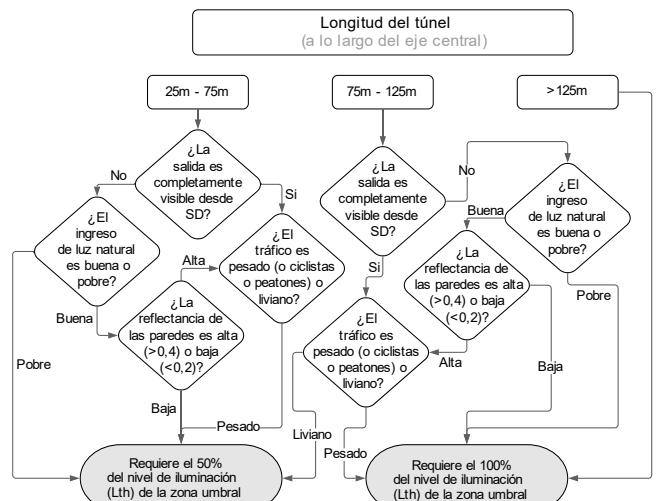


Fig. 1. Determinación de iluminación diurna, adaptación de figura 4.1. [1].

El anterior diagrama (fig.1) indica que es posible que un túnel o paso subterráneo con una longitud superior a los 25m pueda requerir iluminación diurna, por lo que se debe aplicar algún método para llegar al objetivo de diseño de iluminación, obtener un valor adecuado de iluminación para la primera área al ingresar a un túnel, conocida como zona umbral.

## 2. Métodos de cálculo para la iluminación de la zona umbral del túnel.

Para encontrar un valor adecuado de iluminación al interior del portal de entrada, proporcionando orientación en el ingreso, de manera continua, efectiva y segura; la Comisión Internacional de la Iluminación -CIE- determinó [1] dos metodologías de cálculo, método L20 y método de contraste percibido, ambas encaminadas a resolver el valor incógnita y objetivo principal de diseño, la luminancia en la zona umbral ( $L_{th}$ ).

Por tanto, para aplicar ambos métodos, el observador debe ubicarse en un punto referencias, en adelante distancia de parada (SD), con base en la velocidad de circulación, para estimar el valor de luminancia promedio percibido dentro de su campo visual al acercarse a la entrada del túnel. El valor de  $L_{th}$  será entonces una proporción de todas las luminancias que alcanza a percibir desde la distancia de parada.

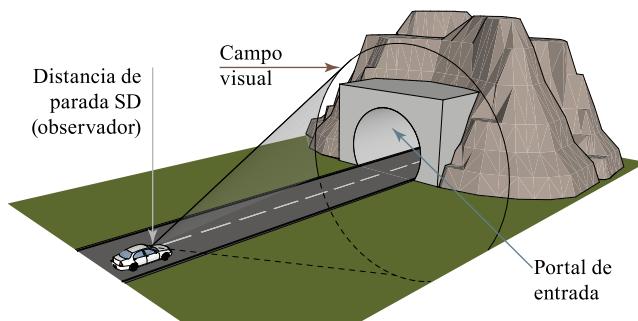


Fig. 2. Relación entre la distancia de parada y el campo de visual del conductor antes de ingresar al túnel.

Para el cálculo de **SD**, se deben considerar variables como, la velocidad de tránsito y la pendiente de ingreso, la guía CIE 88:2004 recomienda usar la siguiente ecuación:

$$SD = (u \cdot t_o) + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (1)$$

Donde,

<i>u</i>	Velocidad de desplazamiento constante (km/h).
<i>t<sub>o</sub></i>	Tiempo de reacción, se puede asumir igual a 1 (s).
<i>g</i>	Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> ).
<i>f</i>	Coeficiente de fricción neumático-pavimento, tomado de la Fig. A.2.2 CIE 88:2004 para pavimento húmedo.
$\pm s$	Pendiente calculada como $\tan(\beta)$ donde $\beta$ corresponde al ángulo de la pendiente; el signo + considerando para pendientes ascendentes; el signo - para pendientes descendentes.

El valor de la distancia **SD** se hace cada vez más corta en relación al portal de entrada, a medida que disminuye la velocidad de tránsito de diseño y aumenta la pendiente de ingreso al túnel, como se puede apreciar en la figura 3.

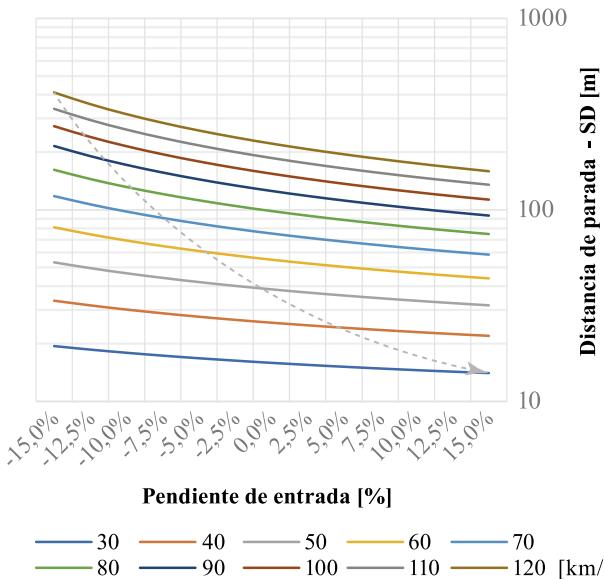


Fig. 3. Distancia de parada SD en relación con la velocidad de circulación y pendiente de calzada.

La variación del valor de *SD* tiene una implicación en la posición del observador y todo lo que alcanza a percibir en luminancias dentro de su campo visual, esto es necesario considerar para evaluar cada uno de los métodos de cálculo. Así mismo, cada método requiere de una fotografía con condiciones particulares tomada justo en el punto referencia *SD*, o un esquema CAD que modele el portal del túnel y sus alrededores.

#### A. El método L20

Corresponde con un método simplificado para determinar un valor de diseño objetivo para la luminancia de la zona umbral (*L<sub>th</sub>*), en función de las luminancias aparentes promedio percibidas por el conductor desde la distancia de parada (*SD*) antes de ingresar a un túnel, en un campo de visión de 20°.

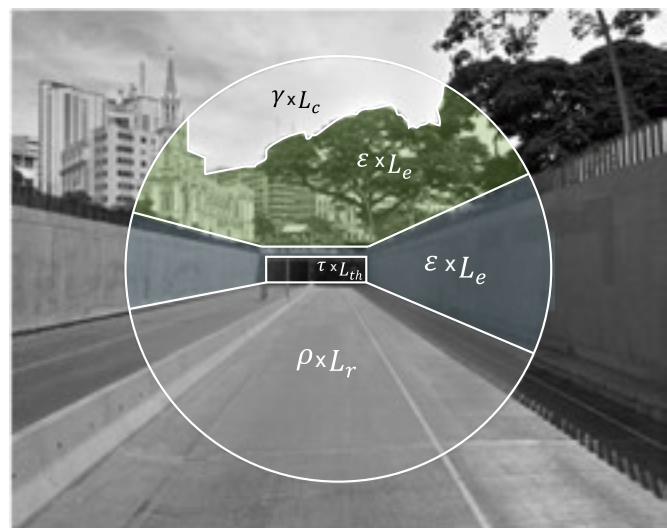


Fig. 4. Ejemplo del método L20, sobre el campo de visión superpuesto a 20° a una distancia *SD*, para evaluación de porcentajes de luminancia aparentes (*L<sub>20</sub>*) en la entrada del túnel.

El método de cálculo está dado por [1] la siguiente fórmula:

$$L_{20} = \frac{\gamma \cdot L_c + \rho \cdot L_r + \varepsilon \cdot L_e + \tau \cdot L_{th}}{1 - K} \quad (2)$$

Donde,

<i>γ</i>	Porcentaje de cielo en el campo de visión,
<i>L<sub>c</sub></i>	Luminancia promedio aparente del cielo,
<i>ρ</i>	Porcentaje de calzada en el campo de visión,
<i>L<sub>r</sub></i>	Luminancia aparente promedio de la calzada,
<i>ε</i>	Porcentaje de alrededores en el campo de visión,
<i>L<sub>e</sub></i>	Luminancia promedio aparente de alrededores (edificios, rocas, prados y/o nevados),
<i>τ</i>	Porcentaje del portal de entrada de túnel en el campo de visión,
<i>L<sub>th</sub></i>	Luminancia de la zona umbral del túnel,

La sumatoria de porcentajes cielo, calzada, alrededores y entrada del túnel deberán dar 100%. Los valores aparentes de luminancias *L<sub>c</sub>*, *L<sub>r</sub>* y *L<sub>e</sub>* están descritos en la tabla 6.2.3 de la CIE 88:2004.

Para evitar los cambios bruscos en la adaptación del observador, evitar por tanto el deslumbramiento, se debe recrear en lo posible las condiciones de luminancia del exterior de carretera a cielo abierto para obtener suficiente visibilidad en la zona de umbral del túnel, la luminancia de la carretera en el ingreso debe alcanzar ciertos valores mínimos. Por tanto,  $L_{th}$  será un porcentaje de la luminancia ( $L_{20}$ ) en la zona de acceso. La relación estaría dada por,

$$L_{th} = k \cdot L_{20} \quad (3)$$

Donde,

$k$  estaría definida de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Relación  $k$  de luminancia definidas por la CIE 88:2004.

Velocidad de diseño (km/h)	$k = L_{20}/L_{th}$
$\leq 60$	5%
80	6%
120	10%

El valor de  $L_{th}$  por tanto será muy pequeño en comparación a la luminancia aparente fuera del túnel, y al estar ubicado el observador a una distancia de parada lejana, se puede prescindir del porcentaje visible del portal ( $\tau$ ) de ingreso dentro del campo visual. Es decir, que el portal se vea lo suficientemente pequeño desde SD, como para despreciar  $\tau$  y  $k$  en la ecuación (2), por tanto, el valor  $L_{20}$  quedará determinado solo en función de las luminancias aparentes de carretera a cielo abierto.

Hasta un 10% se considera un valor aceptable para despreciar el porcentaje ( $\tau$ ) de portal de entrada en el campo de visión de acuerdo a [1].

Sin embargo, considerando velocidades permitidas de circulación bajas, lo que determinaría una distancia de parada SD bastante corta para el observador, dicho porcentaje visible ( $\tau$ ) se convierte en el más relevante y por tanto no se podría menospreciar, lo que conllevaría a no poder aplicar el método simplificado L20.

## B. El método de Contraste Percibido

Esta metodología hace uso de la definición de sensibilidad de contraste [2] para determinar la capacidad de distinguir (vehículos y/o peatones) por parte del conductor los riesgos al ingresar al túnel, en relación a las luminancias tanto al exterior como al interior del portar de entrada, considerando el impacto de cambiar de un contraste positivo a uno negativo, justo en la transición cuando el observador ingresa al túnel.

Implica determinar, según las condiciones antes de entrar al túnel, un valor de luminancia de velo equivalente  $L_{seq}$ , necesario para que la transición entre la luminancia exterior y la luminancia de la zona umbral, no afecte el conductor.

Esta metodología tiene en cuenta factores como la luz dispersa en la atmósfera y parabrisas del vehículo, así como el velo debido a la dispersión del ojo en la línea de visión; también amplia el rango de percepción llegando hasta un campo de visión de 56,8°, obteniendo mayor información relacionada a luminancias promedio aparentes percibidas que puedan llegar a afectar por deslumbramiento al conductor al momento de ingresar a un túnel.

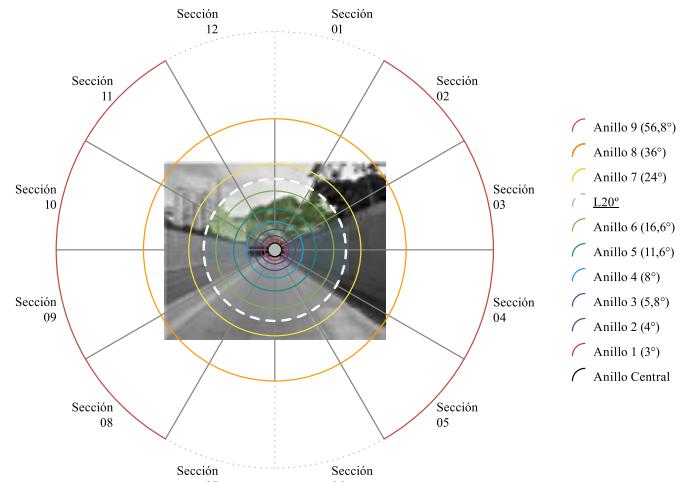


Fig. 5. Ejemplo del método de contraste percibido, sobre el campo de visión superpuesto a 56,8° a una distancia SD, para evaluación de porcentajes de luminancia aparentes ( $L_{seq}$ ) a la entrada del túnel.

Para este método, el cálculo de la luminancia de la zona umbral está dado por [1] la siguiente fórmula:

$$L_{th} = \frac{\frac{(\tau_{ws} \times L_{atm}) + L_{ws} + L_{seq}}{(\tau_{ws} \times \rho_{atm})}}{\frac{1}{C_m} \times \left( \frac{\rho}{\pi \times q_c} - 1 \right) - 1} \quad (4)$$

Donde,

$\tau_{ws}$	Transitividad atmosférica, asumida como 1.
$L_{atm}$	Transmisividad del parabrisas, asumida como 0,8.,
$L_{seq}$	Luminancia de velo equivalente, en un campo de visión de 56,8°.
$C_m$	Contraste percibido mínimo requerido, se recomienda -0,28.
$\rho$	Factor de reflectancia del objetivo, igual a 0,2,
$q_c$	Coeficiente de revelado de contraste [3], puede estar entre 0,2 para sistemas de haz simétrico o 0,6 para sistemas de haz a contraflujo.

La aparente complejidad de la ecuación 4, se limita a la determinación de  $L_{seq}$ , dado que las demás variables están definidas; se deben encontrar los valores adecuados para  $L_{seq}$  aplicando de manera ordenada al diagrama polar mostrado en la Fig. 5. y determinar un  $q_c$  de acuerdo a las características de la instalación proyectada.

Este método no requiere para su aplicación, despreciar el porcentaje visible del portal de entrada dentro del campo de visión a una distancia de parada determinada, por lo que resulta útil aplicarlo en condiciones de velocidades de tránsito reducidas donde el área aparente del portal predomina.

### 3. Túnel modelo contexto colombiano

Considerando que es necesario realizar una captura de imagen del portal de entrada al túnel justo en la distancia de parada y para los casos donde no se han construidos determinarlo por herramientas CAD, se debe proyectar sobre el portal de entrada el campo de visión dependiendo del ángulo del mismo, desde la distancia SD.

Sobre la sección transversal de los túneles, se pueden encontrar de tipo rectangular, parabólico, semicircular y de herradura. Para modelar una situación típica, documentalmente [4] se encontraron variables que establecieron la mínima área para una sección transversal promedio de construcción de un túnel vehicular bidireccional, determinando así un portal modelo que será contemplado para la comparación de ambos métodos de cálculo.

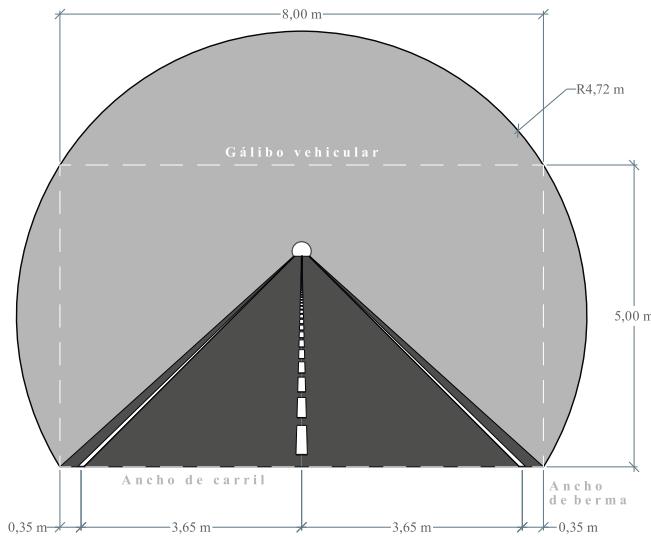


Fig. 6. Modelo geométrico de sección trasversal semicircular mínimo, considerado como ejemplo para el contexto Colombia.

El túnel modelo, tal como se muestra en la Fig. 6, determina un área para el portal de entrada de 57,38m<sup>2</sup>, este valor fue referente comparativo para evaluar el porcentaje visible de portal de entrada.

Las velocidades de tránsito en Colombia están del orden que muestra la tabla 2.

Tabla 2. Velocidades de tránsito para algunos túneles rurales y pasos subterráneos urbanos en Colombia.

Departamento	Túneles por velocidad de circulación					
	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h
Antioquia				1	2	
Bolívar		1				
Boyacá	15					
Nariño			1			
Tolima				2		
Valle			1			5
Villavicencio		1		2		
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>5</b>

### 4. Comparación de metodologías de cálculo

Considerando el área del portal de túnel modelo, se evaluó de acuerdo a cada una de las distancias de paradas (tabla 3) aplicando cada método sugerido por la CIE, tal como se explica en la Fig. 7., el observador se iba cambiando para cada uno de la posición de SD.

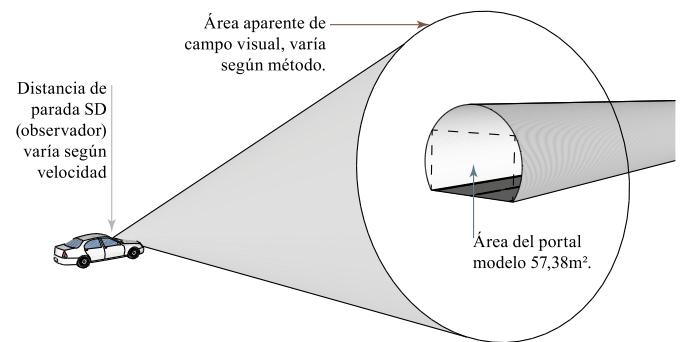


Fig. 7. Esquema de evaluación para comparación de métodos en función del túnel modelo.

Se tomó de esta manera, para considerar el valor mínimo aplicable en área, ya que, si el túnel tiene más carriles, aceras, o elementos adicionales constructivos, el área resultante de sección transversal aumentará.

Tabla 3. Distancias de parada (m) en relación a velocidad de tránsito y pendientes de ingreso al túnel.

Pendiente de entrada (%)	Velocidad de circulación (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
15,0%	14	22	32	44	58	75	93	113	135	159
10,0%	15	23	34	47	63	81	101	124	148	175
5,0%	15	24	36	50	68	88	112	137	165	195
0,0%	16	26	38	55	75	98	125	155	187	222
-5,0%	17	28	42	61	85	112	144	179	217	260
-10,0%	18	30	47	69	98	132	172	215	263	316
-15,0%	19	34	53	81	118	162	216	274	338	411

Las Fig. 8 y Fig. 9 ejemplifican la correspondencia existente para el método L20 y para el método de contraste percibido ( $L_{seq}$ ), entre el campo de visión determinado por cada distancia de parada SD y su relación con el portal de entrada modelo.

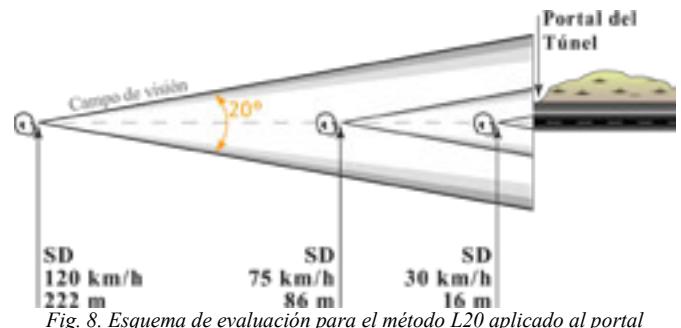


Fig. 8. Esquema de evaluación para el método L20 aplicado al portal modelo.

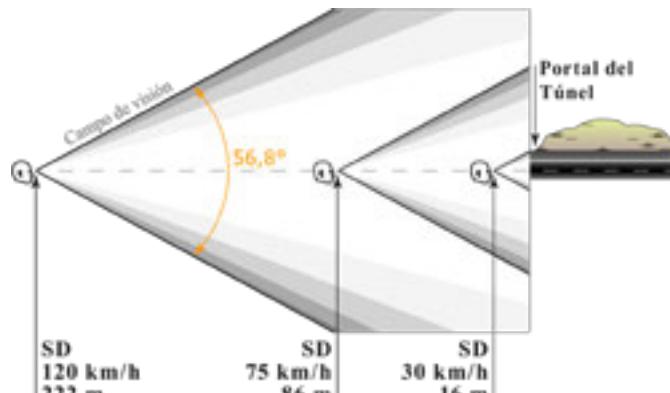


Fig. 9. Esquema de evaluación para el método  $L_{seq}$  de contraste percibido aplicado al portal modelo.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Porcentaje visible de portal del túnel ( $\tau$ ) en relación al campo de visión 20° (método L20).

Pendiente de entrada (%)	Velocidad de tránsito (km/h)										
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
15,0%	81%	70%	56%	30%	17%	10%	7%	5%	3%	2%	
10,0%	79%	69%	51%	27%	15%	9%	6%	4%	3%	2%	
5,0%	79%	69%	45%	23%	13%	8%	5%	3%	2%	2%	
0,0%	77%	66%	41%	19%	10%	6%	4%	2%	2%	1%	
-5,0%	76%	63%	33%	16%	8%	5%	3%	2%	1%	1%	
-10,0%	74%	60%	27%	12%	6%	3%	2%	1%	1%	1%	
-15,0%	73%	51%	21%	9%	4%	2%	1%	1%	1%	0%	

Tabla 5. Porcentaje de portal del túnel ( $\tau$ ) en relación al campo de visión 56,8° (método de contraste percibido)

Pendiente de entrada (%)	Velocidad de tránsito (km/h)										
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
15,0%	40%	16%	8%	4%	2%	1,4%	0,9%	0,6%	0,4%	0,3%	
10,0%	35%	15%	7%	4%	2%	1,2%	0,8%	0,5%	0,4%	0,3%	
5,0%	35%	14%	6%	3%	2%	1,0%	0,6%	0,4%	0,3%	0,2%	
0,0%	31%	12%	5%	3%	1,4%	0,8%	0,5%	0,3%	0,2%	0,2%	
-5,0%	27%	10%	4%	2%	1,1%	0,6%	0,4%	0,2%	0,2%	0,1%	
-10,0%	24%	9%	4%	2%	0,8%	0,5%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	
-15,0%	22%	7%	3%	1%	0,6%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	

Lo anterior denota que, usando el método L20, a una velocidad de tránsito permitida, por ejemplo, a 50km/h el porcentaje de  $\tau$  sería del 41% respecto al campo de visión, lo que implica que esta metodología no aplica en túneles con velocidades iguales o menores al ejemplificado; mientras que al usar el método de contraste percibido ( $L_{seq}$ ) el porcentaje de portal de entrada respecto a todo el campo de visión sería apenas del 5%.

También se compararon los valores mínimos de diseño  $L_{th}$  que se podría llegar a tener utilizando la guía de la CIE; para el método L20 se desprecia a un 10% el portal de entrada en el campo de visión y se asume únicamente calzada y alrededores en prados.

Para el método de contraste percibido se asumió que el portal de entrada del túnel comprendería todo el campo de visión; los resultados se describen en la siguiente tabla.

Tabla 6. Valores mínimos de luminancia en la zona umbral para condiciones extremas en ambos métodos.

Método	Valor de $L_{th}$
L20 Simplificado	120 cd/m <sup>2</sup>
Contraste percibido $L_{seq}$ (haz simétrico)	165 cd/m <sup>2</sup>
Contraste percibido $L_{seq}$ (haz a contraflujo)	380 cd/m <sup>2</sup>

Tal como se menciona en [5] los valores de  $L_{th}$  para una distancia de parada desde 60m, es decir para velocidades entre 60km/h a 70km/h en adelante, deben empezar a ser aproximadamente igual a los valores de  $L_{seq}$ . Demostrando de esta manera que la iluminación proyectada en la zona de umbral sirve para contrarrestar el deslumbramiento al ingresar al túnel, aumentando el valor  $L_{th}$  a aproximadamente al valor  $L_{seq}$ .

## 5. Conclusiones

El método L20 no está orientado a aplicaciones de diseño para túneles con velocidades inferiores a 60 km/h, para velocidades de diseño bajas debe utilizarse el método de contraste percibido, de esta manera al ampliar el campo de visión al determinar  $L_{seq}$  se pueden incluir valores de percepción de luminancia más allá del propio portal de entrada.

Para velocidades de tránsito superiores a 60km/h cualquiera de los métodos presentados es aplicable.

El nivel de iluminación calculado estará siempre en función de la velocidad de tránsito definida, esto implica que, al diseñar sistemas de iluminación para túneles, considerando velocidades de circulación futuras superiores a la existente, se podría incurrir en sobrecostos en los proyectos de infraestructura, dado que no se modifique la velocidad y no se implementen sistemas de control por luminancia. Por tanto, al cambiar la velocidad de circulación permitida de ingreso al túnel, es necesario calcular nuevamente el valor de  $L_{th}$ , dado que cambia el valor de SD.

Se pueden cambiar las políticas de tránsito respecto a una velocidad de circulación por un valor menor, siempre y cuando la iluminación del túnel fuese diseñada a una velocidad superior, hacerlo al contrario induce al error e implica un incumplimiento reglamentario.

## 6. Referencias

- [1] CIE 088:2004 Guide for the lighting of road tunnels and underpasses, 2nd ed., 2004.
- [2] International Commission on Illumination, CIE, <http://eilv.cie.co.at/term/255>. (ultimo acceso September de 2020)
- [3] International Commission on Illumination, CIE, <http://eilv.cie.co.at/term/254>. (ultimo acceso September de 2020)
- [4] Instituto Nacional de Vías – Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia, 2003.
- [5] Kai Sørensen, “Values of L20 and Lseq for tunnels in Norway” Velkommen til Nordisk Møde for Forbedret Vejudstyr (NMF), 2018.

## 7. Biografías

**Angélica Vargas Chavarro.** Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Cundinamarca, Especialista en Iluminación y Magíster en Automatización de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en Control, Diseño de Iluminación y en Planeación de Sistemas de Alumbrado Público.

**Mauricio Polanco González.** Ingeniero Electricista egresado de la Universidad del Valle, Especialista en Iluminación de la Universidad Nacional de Colombia. Experto en áreas temáticas de Iluminación Urbana y Alumbrado Público, trabaja como consultor para su estudio de diseño de iluminación LÉXICA LightInk.

# Radiación Ultravioleta C aplicada a la desinfección de ambulancias

Eduardo Manzano<sup>1,a</sup>, Martín Ferreira<sup>2,b</sup>, Daniela Cudmani<sup>3,c</sup>, Dardo Costa<sup>3,d</sup>, Marcelo De Nobrega<sup>1,e</sup>, Ana Gómez Marigliano<sup>4,f</sup>, Sergio Gor<sup>1,g</sup>, Leonardo Assaf<sup>1,h</sup>, Graciela Tonello<sup>1,i</sup>, Mario Raitelli<sup>1,j</sup>, Miguel Cabrera<sup>5,k</sup>

<sup>1</sup> Depto. de Luminotecnia Luz y Visión, FACET, Universidad Nacional de Tucumán – ILAV UNT CONICET, Argentina.

<sup>2</sup> Depto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

<sup>3</sup>Laboratorio de Salud Pública, Ministerio de Salud Pública de la Provincia de Tucumán, Argentina.

<sup>4</sup> Depto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán - INFINOA CONICET, Argentina.

<sup>5</sup> Dpto. de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Computación, Fac. de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

<sup>a</sup> emanzano@herrera.unt.edu.ar, <sup>b</sup> mferreira@herrera.unt.edu.ar, <sup>c</sup> dcudmani@outlook.com, <sup>d</sup> dardocostas@gmail.com

<sup>e</sup> mdenogrega@herrera.unt.edu.ar, <sup>f</sup> agomezmarigliano@herrera.unt.edu.ar, <sup>g</sup> sgor@herrera.unt.edu.ar, <sup>h</sup> lassaf@herrera.unt.edu.ar,

<sup>i</sup> gtonello@herrera.unt.edu.ar, <sup>j</sup> mraitelli@herrera.unt.edu.ar, <sup>k</sup> mcabrera@herrera.unt.edu.ar

**Resumen**— Ante la posibilidad de la contaminación de las superficies y el aire en el interior de ambulancias por virus como el SARS-CoV-2 se emplean para la desinfección generalmente químicos. El proceso puede ser complementado con radiación ultravioleta C (UVC). Para ello se estudiaron las tecnologías disponibles y se realizaron mediciones de irradiancia espectral UVC. Se estudiaron las dosis necesarias para la inactivación de virus y la forma más efectiva de irradiar las superficies. Distintas configuraciones en ambulancias y materiales empleados fueron analizados y estudiadas sus propiedades de reflectancia y transmitancia espectral en el UVC. Con dicha información y un modelo en 3D se renderizaron imágenes del interior de la ambulancia irradiadas con un prototipo de UVC desarrollado. Los resultados simulados se compararon con pruebas reales para distintas dosis y test bacteriológicos simultáneos, con lo cual se efectuaron posteriores ajustes en los tiempos de exposición necesarios y se propone un sistema de irradiación preliminar más efectivo.

**Palabras clave.** *UVC para Desinfección, Test UFC con UVC en ambulancias, render de irradiación UVC*

**Abstract.** Surfaces and air inside ambulances can be contaminated by viruses such as SARS-CoV-2. Chemicals are generally used for disinfection. The process can be complemented with ultraviolet C radiation (UVC). For this, the available technologies were studied and UVC spectral irradiance measurements were carried out. The doses required for virus inactivation and the most effective way to irradiate surfaces were stud-d. Different configurations in ambulances and materials used were analysed and studied their spectral reflectance and transmittance properties in UVC. With that information, a 3D interior ambulance model was built to render images with a program of the irradiance UVC distribution of a prototype. The simulated results were compared with real tests carried out under different irradiations doses and bacteriological examinations. Finally adjustments were made in the irradiation exposure times to achieve a more effective system based in the prototype.

**Key Words:** *Ambulances UVC disinfection, UFC Test with UVC in ambulances, UVC irradiation image render*

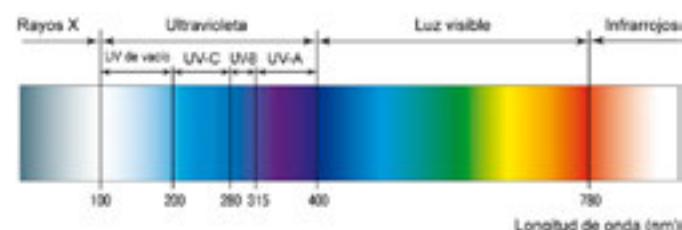
## 1. Introducción

El COVID-19 es la enfermedad respiratoria causada por la infección del virus SARS-CoV-2 que se ha transformado en pandemia debido a su propagación mundial afectando la salud, la vida de un porcentaje de la población y la economía de las naciones. Estudios preliminares indican que la transmisión se produce por el contacto con el spray de gotas expulsadas por personas infectadas al estornudar, toser, hablar o por contacto con superficies contaminadas al ser alcanzadas por gotas

directamente o indirectamente de personas infectadas [1]. Investigaciones de la supervivencia del virus Sars-CoV-2 en distintas superficies indican que puede durar y seguir siendo infeccioso activo hasta 7 días en superficies lisas como plástico, acero inoxidable, vidrio, cerámica y guantes de látex, 5 días en papel, 4 días en ropa de algodón y 24 horas en cartón [2][3]. La inactivación de los coronavirus en superficies puede realizarse desinfectando las superficies con medios químicos como: alcohol al 62-71%, vapor de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 0,5% o hipoclorito de sodio (cuya disolución en agua es conocida como lavandina, cloro o lejía) al 0,1% entre otros [4] y también mediante radiación ultravioleta (UV) dependiendo de la dosis aplicada.

La radiación UV es energía electromagnética de longitud de onda entre 100 y 400nm. Se divide en 4 grupos principales, ver Fig.1 [5], cada uno con un efecto germicida diferente: UV-A (315–400nm), UV-B (280–315nm), UV-C (200–280nm), UV en vacío (100-200nm).

Fig. 1: Espectro de radiación Ultravioleta y UVC de 200 a 280nm [5].



El uso de radiación UV es conocido desde hace más de 60 años para la eliminación de bacterias y en particular la radiación UV-C de 200nm a 280nm para la eliminación de virus en general [6][7]. Actualmente se emplea radiación UV-C para esterilización de quirófanos, instrumental, de aire en Aire Acondicionadores y de agua en plantas de tratamiento [8][9][10]. Después del proceso de desinfección químico puede aplicarse el UV-C para complementar la desinfección.

## 2. El efecto germicida del UV

El UV-C es la componente de radiación que más fácilmente absorben el ADN (ácido desoxirribonucleico), el ARN (ácido ribonucleico) y las proteínas. A menudo este intervalo de radiación se conoce como “germicida” dada su alta eficiencia de desinfección frente a las bacterias y a los virus. El efecto germicida se basa en la absorción de fotones por parte de las moléculas de ADN y ARN, cuando la reacción fotoquímica producida provoca la dimerización de los enlaces del ADN y el ARN, que inhibe la capacidad de los microorganismos de replicarse (ver Fig.2). Este proceso se conoce como inactivación de microorganismos [5][8].



Fig. 2: Efecto de la radiación UV en la absorción de fotones de las moléculas de ADN y ARN de los virus [5][8].

Se debe aclarar que el SARS-CoV-2 no ha sido testeado con UV pero otros corona virus similares lo fueron y se trabaja con dichos resultados para aplicarlos en el virus SARS-CoV-2 por la novedad y riesgo que representa.

La eficacia de una fuente de radiación UV se cuantifica en base a la efectividad germicida del UV frente a la bacteria Escherichia coli (ver Fig.3) [11][12][13][14], que es una bacteria que se encuentra en los alimentos y en el medio ambiente. La mayor eficiencia del efecto germicida sobre el ADN de las bacterias de Escherichia Coli tiene sus picos en 220nm y entre 260-265nm. Esto puede variar entre especies de bacterias y virus [8]. Se indica además en la Fig. 3 la emisión irradiancia espectral (potencia radiada por unidad de superficie y longitud de onda) de la fuente UV-C de mercurio de baja presión. Cuanto mayor sea la irradiancia  $Ee(W/m^2)$  (área bajo la curva de emisión irradiancia espectral) y cuanto mayor sea también el tiempo de exposición  $te(s)$  a la misma, mayor será el efecto germicida. El producto de la irradiancia y el tiempo de exposición determinan la dosis de exposición (ver ecuación 1). La Dosis de radiación UV para el 90% de inactivación de virus ( $D_{90}$ ) depende del tipo de virus y de la humedad relativa. Valores recomendados se indican en la Tabla 1.

$$Dosis = Ee(W/m^2) \cdot te(s) \quad (1)$$

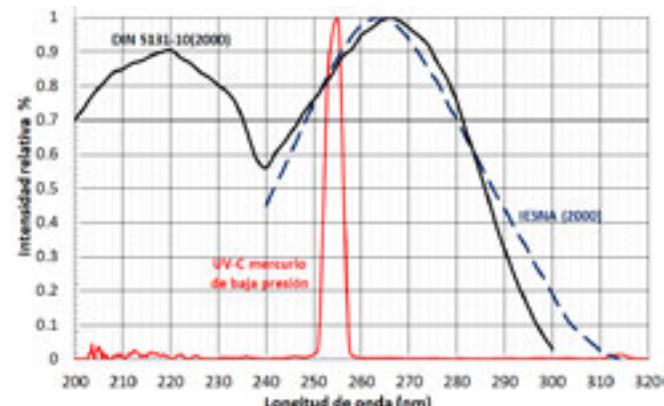


Fig.3: Efectividad germicida del UV frente a la bacteria Escherichia coli [11,12,13,14] y emisión espectral de la fuente UV-C de mercurio de baja presión.

Tabla 1: Dosis de radiación UV para el 90% de inactivación de virus [14].

Microbe	$D_{90}$ Dose J/m <sup>2</sup>	Source
Coronavirus	7	Walker 2007 <sup>a</sup>
Berne virus (Coronaviridae)	7	Weiss 1986
Murine Coronavirus (MHV)	15	Hirano 1978
Canine Coronavirus (CCV)	29	Sakunimit 1988 <sup>b</sup>
Murine Coronavirus (MHV)	29	Sakunimit 1988 <sup>b</sup>
SARS Coronavirus CoV-P9	40	Duan 2003 <sup>c</sup>
Murine Coronavirus (MHV)	103	Liu 2003
SARS Coronavirus (Hanol)	134	Kariwa 2004 <sup>d</sup>
SARS Coronavirus (Urbani)	241	Dannell 2004
Average	67	

<sup>a</sup>(Jingwan 2020)

<sup>b</sup>(at 3 logs)

$D_{90}$  mínimo varía de 7 J/m<sup>2</sup> a 241 J/m<sup>2</sup> con una media de 67 J/m<sup>2</sup> [16]. Como se observa en la lista hay varios coronavirus, sin embargo no hay datos específicos para el SARS-CoV-2. Por otra parte, la humedad mayor al 70% podría reducir la efectividad de la dosis. ¿Cuál es el valor más adecuado de dosis a emplear?

El tiempo de exposición puede ahora estimarse en base a la dosis y a la irradiancia según ecuación 2.

$$te(s) = Dosis / Ee(W/m^2) \quad (2)$$

## 3. Tecnología UVC

Distintos tipos de fuentes de UV son empleadas para desinfección. Fuentes de mercurio de baja (MBP) y de media presión (MMP), lámpara de gas xenón pulsante, fuentes excimer con gas kryptón-Cloro (Kr-Cl) y fuentes LED. La Fig. 4 muestra la irradiancia espectral de la fuente de MBP y de MMP, frente a la efectividad germicida sobre la Escherichia Coli.

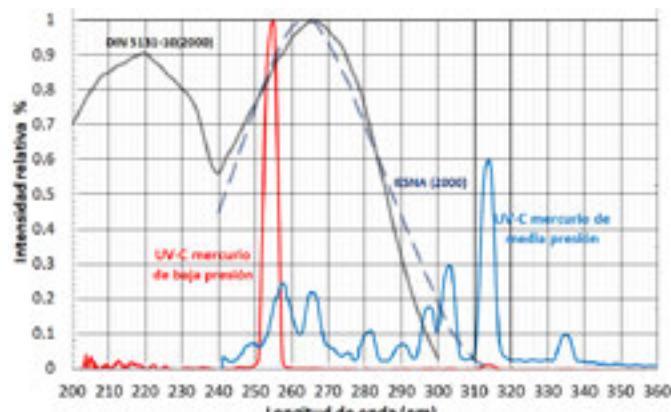


Fig.4: Irradiancias espetrales medidas en el Depto. de Luminotecnia Luz y Visión de las fuentes MBP y MMP frente a la efectividad germicida del Escherichia Coli [11][12].

Aproximadamente el 95% del área dentro de la curva de distribución espectral (irradiancia) es producida en 253,7nm, para la fuente MBP, valor muy cerca de un pico de efectividad germicida sobre la Escherichia Coli [11][12]. En cambio el 79% del área de la distribución espectral (irradiancia) de la fuente MMP se encuentra bajo la curva de Efectividad germicida. Siendo por lo tanto más eficiente como germicida la fuente de MBP. Por otra parte su costo es bajo y está más difundido su uso en distintos formatos y aplicaciones. Como desventaja ambas fuentes contienen mercurio y dependiendo de la dosis su radiación puede afectar ojos y piel de personas expuestas. Cabe destacar que también emiten radiación en 185nm lo que genera ozono que puede producir enfermedades respiratorias. Para evitar la emisión de ozono (que tiene un olor muy característico) el bulbo de vidrio debe estar construido de modo de filtrar la baja emisión de 185nm por ej. con cuarzo dopado fundido. [15].

La fuente de gas de xenón pulsante emite en el UVC y en el UVB siendo su efectividad germicida algo menor al de la fuente MBP [16]. En Fig. 6 se indica la irradiancia espectral de una fuente de gas de xenón pulsante. Las fuentes excimer con gas Kr-Cl emiten en 222nm (ver Fig.7) con efecto germicida similar a la MBP, con la ventaja de producir un menor riesgo de daño en piel y ojos [17].

Las fuentes LED UVC están en un proceso de evolución y posiblemente en poco tiempo reemplacen las fuentes anteriormente mencionadas. Algunas emiten en 222nm con las mismas ventajas anteriormente mencionadas otras entre 265 y 270nm [18].

Por otra parte en las fuentes de MBP y LEDs, la depreciación L80 B50 es del orden de 5.000h a 8.000h., factor que debe ser considerado para mantener las condiciones germicidas.

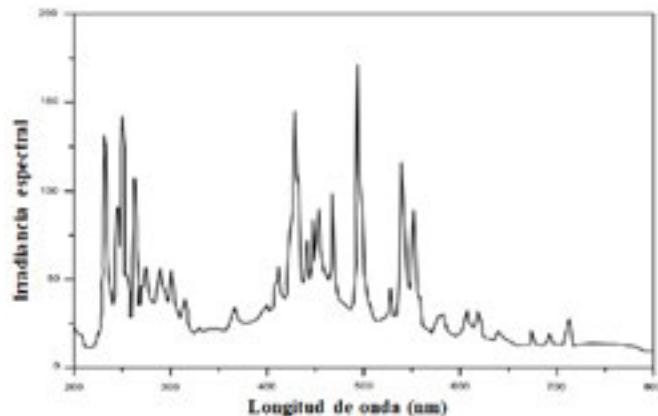


Fig.6: Irradiancia espectral de la fuente de gas de xenón pulsante [16].

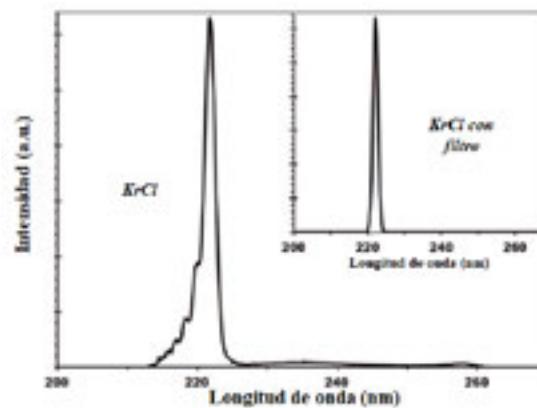


Fig.7: Irradiancia espectral de la fuente excimer Kr-Cl con emisión en 222nm [19].

#### 4. Simulación de irradiancia en una Ambulancia

La simulación de los valores de irradiancia sobre las distintas superficies de una ambulancia es una herramienta muy útil para estimar los tiempos de exposición necesarios en base a la dosis establecida y para poder determinar la configuración más adecuada de alternativas de sistemas de radiación para evitar zonas de sombras de UVC que no permitirían la desinfección adecuada. Como elementos de partida es necesario disponer del modelo en 3D del interior de una ambulancia típica al cual se asociaran las propiedades de reflexión y transmisión espectral del UV-C correspondientes a los materiales que la conforman. Se requiere además la información de cómo distribuye espacialmente la radiación UV-C el sistema de desinfección a utilizar, lo que sería equivalente a la fotometría de una luminaria, es decir, su distribución de intensidades luminosas. Con esta información se puede utilizar un programa de cálculo y simulación de iluminación fotométrico como Dialux [19] para calcular valores de irradiancia (los resultados estarán expresados en lux pero corresponden a W/m<sup>2</sup>).

#### A. Intensidad radiante de la fuente UV

La información de cómo distribuye espacialmente la radiación UV-C el sistema de desinfección requiere conocer la intensidad radiante  $Ie$ (W/sr). Las magnitudes radiométricas de donde se derivan las fotométricas se indican en Tabla 2, donde  $Ie$  es el parámetro radiométrico de donde se deriva la Intensidad luminosa  $I$ (cd/m<sup>2</sup>). Si se elabora un archivo en formato ies [20] o eulumdat [21] que en lugar de contener valores de  $I$ (cd/m<sup>2</sup>) contiene valores de  $Ie$ (W/sr) para ser utilizado tal como si fuera una fotometría en el programa de simulación, obtendríamos como resultados de cálculo irradiancia  $Ee$  (W/m<sup>2</sup>) en lugar de iluminancia  $E$  (lx).

Tabla 2: Analogía entre magnitudes radiométricas y fotométricas

Magnitud radiométrica	Símbolo unidades	Definición	Magnitud fotométrica	Símbolo unidades	Definición
Energía radiante	Qe Joule=W.s	-	Energía luminosa	Q lx.s	-
Flujo radiante (o potencia)	Qe o Pe W	$Qe=dQe/dt$	Flujo luminoso	Q lm	$Q=dQ/dt$
Irradiancia	$Ee$ W/m <sup>2</sup>	$Ee=dQe/dA$	Iluminancia	$E$ lx = lm/m <sup>2</sup>	$E=dQ/dA$
Intensidad radiante	$Ie$ W/mr	$Ie=dQe/dΩ$	Intensidad luminosa	$I$ cd = lm/rad	$I=dQ/dΩ$
Radiancia	$L_e$ W/(sr m <sup>2</sup> )	$L_e=dIe/dA \cos\gamma$	Luminancia	$L$ cd/m <sup>2</sup>	$L=dI/dA/\cos\gamma$
Exposición radiante	$H_e$ J/m <sup>2</sup>	$H_e=Ee.t$	Exposición	$H$ lm.s	$H = E.t$

Unidad fotométrica = 683. V(λ). Unidad Radiométrica  
Magnitudes espestrales: por unidad de longitud de onda, se incorpora dλ en la definición y dλ o λdm en las unidades.

La  $Ie$  se puede estimar a partir de la  $Ee$  (W/m<sup>2</sup>) de ecuación 3 donde  $d$  es la distancia entre la fuente de radiación y un punto sobre una superficie y  $\gamma$  el ángulo entre la dirección de  $Ie$  y la perpendicular a la superficie (ver figura 8). Esto es válido para  $d$  mayor a 10 veces el tamaño de la fuente emisora para que sea considerada puntual.

$$Ie = Ee \cdot \cos \gamma / d^2 \text{ (W/sr)} \quad (3)$$

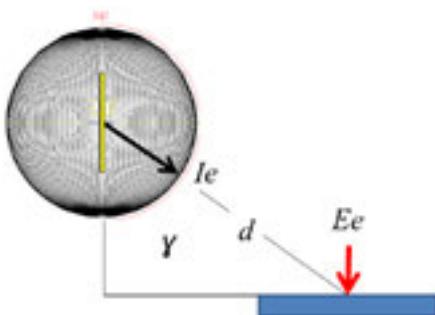


Fig.8: Intensidad radiante  $Ie$  e Irradiancia  $Ee$  de una fuente uniforme.

Como fuente de radiación UV-C a utilizar en el trabajo fueron seleccionados tubos de MBP de 30W en base a la eficiencia germicida y disponibilidad del mercado. La irradiancia espectral de la fuente en posición vertical fue medida a 2m de distancia perpendicular a la misma (ver Fig. 4) mediante un espectro radiómetro Flame-T Ocean Optics UV-

VIS 200-850nm. La irradiancia obtenida fue:  $Ee@2m= 0,256$  W/m<sup>2</sup> con lo cual  $Ie = 1,024$  W/sr.

#### B. Prototipo de sistema de desinfección

Un prototipo fue diseñado para ser utilizado en la desinfección del interior de ambulancias que emplea dos fuentes de UVC de MBP de 30W (ver Fig.10). El sistema apoyado sobre un trípode es regulable en altura. Posee un temporizador digital, un sensor de presencia para evitar su funcionamiento en presencia de personas y un botón luminoso de operación desde el exterior (o control remoto). Se estima en base la medición de  $Ee@2m$  realizada con un tubo, que el sistema puede proveer sobre un punto de un área a 1,2m y a 45° respecto del prototipo  $Ee=1W/m^2$  con lo cual para una dosis de 241J/m<sup>2</sup> se requerirá un tiempo de exposición  $te=4$  minutos.

#### C. Configuración y materiales de ambulancias

Las ambulancias son recintos reducidos con mobiliario y equipos de alta complejidad en distintos arreglos. En Fig. 9 se muestra una vista desde las puertas traseras de una ambulancia. La radiación UV-C debe llegar a todas las superficies con la dosis mínima necesaria y sin la presencia de sombras.

Fig. 9: Interior de una ambulancia con camilla móvil y portátil, silla de



ruedas, asiento tipo butaca, baulera, AA, ventilador, etc.

Los materiales que intervienen fueron estudiados para construir el modelo en 3D lo más próximo posible a la realidad. En general los materiales presentan baja reflexión al UVC del 5-10% salvo superficies de acero inoxidable (35-40%) o aluminio (90-95%)[14]. El cortinado y recubrimiento de plástico presenta una transmitancia nula al UV-C de 254nm (ver Fig. 11).



Fig. 10: Interior de una ambulancia visto desde la puertas lateral y detalle del prototipo utilizado ubicado para el test.

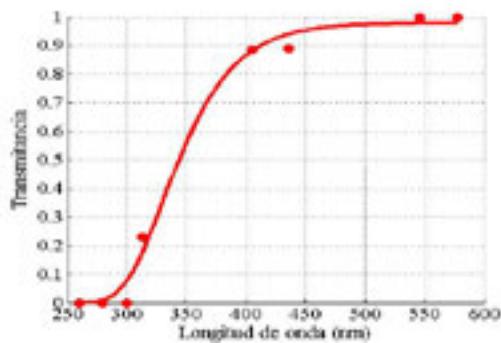
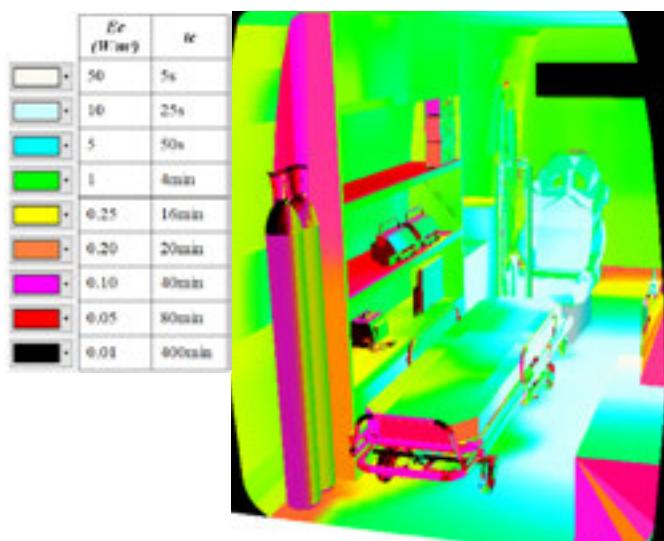


Fig. 11: Transmitancia espectral medida en el Depto. Luminotecnia luz y Visión con fuente MMP en plástico tipo cristal.

#### D. Simulación de irradiación con prototipo

Con el modelo 3D, los datos de materiales, el archivo ies de las fuentes y una ubicación de un prototipo entre la camilla y la butaca central, se realizaron simulaciones de irradiancias en falsos colores con el programa Dialux, una de las cuales se indica en Fig. 12. Se observa que para una irradiancia mínima de  $1\text{W/m}^2$  quedan superficies que no alcanzarían a ser desinfectadas en un tiempo razonable. Un solo prototipo es



insuficiente. Sin embargo en las zonas con  $Ee > 1\text{W/m}^2$  y  $te$  de 4min mínimos aparentan ser indicados.

#### 5. Test bacteriológico

A fin de verificar la efectividad germicida del UV-C y los tiempos de exposición, el Laboratorio de Salud Pública del Ministerio de Salud de la Prov. de Tucumán, realizo un test de muestreo ambiental con hisopo estéril en el interior de ambulancia sobre la camilla y en el suelo cercano. Los test se realizaron antes y después de irradiar durante 10min y 20min con el prototipo de UV-C ubicado como indica la Fig.10.

Fig. 12: Simulación con un prototipo, valores de  $Ee$  obtenidos y tiempos teóricos de exposición se indican en escala de colores.

Los puntos de muestreo debían recibir una  $Ee$  próxima a  $1\text{W/m}^2$ . Los muestreros se cultivaron en placas de agar sangre que se incubaron a  $35^\circ\text{C}$  durante 48h en atmósfera aeróbica. Posteriormente se realizó el conteo de las Unidades de Formación de Colonia (UFC). Los resultados obtenidos indicados en Tabla 3 muestran una reducción importante (equivalente a 0% en camilla y al 7% en el suelo) de UFC al cabo de 20min. La porosidad del suelo y la necesidad de una limpieza profunda podrían ser las causas de UFC detectadas.

Tabla 3: Conteo de Unidades de Formación de Colonia resultantes del muestreo en el interior de la ambulancia

Superficie designada	UFC		
	Pre-exposición	10min	20min
Camilla	13	6	0
Piso	14	7	1

#### 6. Ajuste y simulación con sistema

En base a los resultados del test se simula nuevamente la irradiación con dos prototipos, el primero en la misma ubicación anterior y el segundo ubicado detrás de la butaca en la cabecera de la camilla móvil. Los resultados obtenidos en la

simulación se indican en Fig. 13. La escala de tiempos se ajusta ahora para  $E_e > 1\text{W/m}^2$  y te de 20min mínimos. Se observa que se alcanza a irradiar prácticamente todas las superficies salvo parte de la estructura bajo la camilla móvil y algunas caras ocultas del equipamiento con lo cual sería un complemento adecuado para otros tratamientos de desinfección.

## 7. Evaluación del riesgo de UV

Es conocido el efecto nocivo sobre la piel y en los ojos de personas por parte del UV por lo que su utilización requiere evitar la exposición o el uso de protección adecuada.

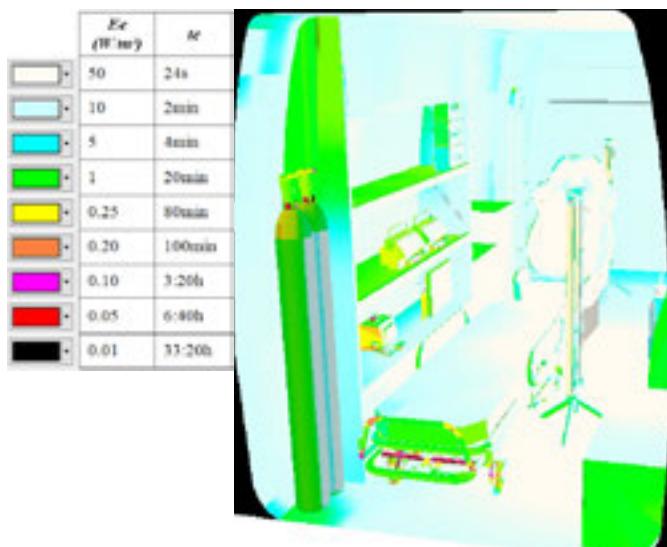


Fig. 12: Simulación con dos prototipos. Los valores de  $E_e$  obtenidos y tiempos teóricos de exposición en base a la dosis indicada en Tabla 1.

El sistema propuesto se opera a puertas cerradas (el vidrio de ventanas bloque el UV-C). La evaluación del riesgo ocupacional a la radiación UV (180- 400nm) [22] en ojos/piel sin protección indica que el tiempo de exposición máximo no debe exceder 1 min. a 1,5m durante la jornada para el sistema propuesto.

## 8. Conclusiones

Se estudia un sistema de radiación UV-C como alternativa que permite la desinfección complementando a la limpieza con químicos. La porosidad de ciertas superficies y la baja penetración en suciedad del suelo del UV-C hacen necesarios te de 20min con dos prototipos para cubrir gran parte de las superficies de la ambulancia. El posible deterioro de materiales (agrietamiento), cambio de coloración es un tema de estudio pendiente en el uso del UVC en el uso en ambulancias. Otras configuraciones de sistemas están en proceso de estudio.

## 9. Referencias

- [1] Tellier, R.; Li, Yuguo; Cowling, B.; Tang, J.. (2019). Recognition of aerosol transmission of infectious agents: A commentary.BMC Infectious Diseases. 19.10.1186/s12879-019-3707-y.
- [2] Covid-19: How long does the coronavirus last on surfaces? <https://www.bbc.com/future/article/20200317-covid-19-how-long-does-the-coronavirus-last-on-surfaces>. 24/08/2020
- [3] van Doremalen, N.; Bushmaker, T.n Morris, D.; Holbrook, M. G.; Gamble, A.; Williamson, B. N.; Tamin, A.; Harcourt, J. L.; Thornburg, N. J.; Gerber, S. I.; Lloyd-Smith, J. O.; de Wit, E.; Munster, V.J. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. Journal Article 2020 New England Journal of Medicine (1564-1567)10.1056/NEJMc2004973 April 16, 2020 <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMc2004973>
- [4] G. Kampf, D. Todt, S. Pfaender, E. Steinmann. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. The Journal of Hospital Infection. 104 (2020) 246-251. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.022> Published by Elsevier Ltd.
- [5] Tecnología de desinfección UV. <https://www.lit-uv.com/es/technology/> consultada el 24/08/2020
- [6] Kowalski, Wladyslaw. (2009). Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. 10.1007/978-3-642-01999-9\_10.
- [7] Reed, N. G. (2010). The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. Public Health Reports, 125(1), 15–27. <https://doi.org/10.1177/003335491012500105>
- [8] ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation). Health Physics 87 (2): 171-186; 2004. <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUV2004.pdf>
- [9] Illuminating Engineering Society (2005). ANSI/IESNA RP -27.3-07. Photobiological Safety for Lamps and Lamp Systems-Risk Group Classification. New York. IES.
- [10] Posición de la CIE respecto a la radiación ultravioleta (UV) para reducir el riesgo de transmisión del COVID-19. [http://cie.co.at/files/CIE%20Position%20Statement%20-%20UV%20radiation%20\(2020\)\\_ES\\_0.pdf](http://cie.co.at/files/CIE%20Position%20Statement%20-%20UV%20radiation%20(2020)_ES_0.pdf). Consultada 20/5/2020
- [11] DIN. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, DIN 5031-10:2000-03, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany, 2000.
- [12] IESNA. Nonvisual Effects of Optical Radiation. Lighting Handbook 9th Edition 2000.
- [13] Charles H. Wick, Mary Margaret Wade, Tracey D. Biggs, Leslie I. Williams, Alan W. Zulich. Effects of repeated exposure to filtered and unfiltered broadband light radiation on Escherichia Coli growth and propagation. August 2012. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a568526.pdf>
- [14] Kowalski, Wladyslaw & Walsh, Thomas & Petraitis, Vidmantas. (2020). 2020 COVID-19 Coronavirus Ultraviolet Susceptibility. 10.13140/RG.2.2.22803.22566.
- [15] Sven Schalk, Volker Adam, Erich Arnold, Karl Brieden, Alex Voronov and Hans-Dieter Witzke. UV-Lamps for Disinfection and Advanced Oxidation - Lamp Types, Technologies and Applications. UV Congress in Whistler, BC, Canada in May 2005. [https://iuvanews.com/stories/pdf/archives/080103Schalk\\_Article\\_2006.pdf](https://iuvanews.com/stories/pdf/archives/080103Schalk_Article_2006.pdf) Consultada el 20/5/2020.
- [16] Dubravko Risočić, Mirela Maver Biscanin, Marinka Mravak-Stipetić, Alen Bišćanin. Quantitative Investigation of Efficiency of Ultraviolet and Visible Light in Eradication of Candida albicans In Vitro. Photomedicine and laser surgery 32(4):232-9. DOI: 10.1089/pho.2013.3691. March 2014
- [17] M. Buonanno, B. Ponnaiya, D. Welch, M. Stanislauskas, G. Randers-Pehrson, L. Smilenov, F. Lowy, D. Owens, D.Brenner. Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light Radiation Research, 187(4):483-491. DOI: <http://dx.doi.org/10.1667/RR0010CC.1> 2017.
- [18] IES CR-2-20-V1 Germicidal Ultraviolet (GUV) – Frequently Asked Questions. <https://www.ies.org/standards/committee-reports/ies-committee-report-cr-2-20-faqs/>
- [19] Dialux y Dialux evo. <https://www.dial.de/en/home/> Consultada 27/2/2020
- [20] IES LM-79- 2019. Approved Method: Optical and Electrical Measurements of Solid-State Lighting Products. IESNA.
- [21] Stockmar, A. W. 1998. "EULUMDAT/2 - Extended Version of a Well Established Luminaire Data Format," 1998 CIBSE National Lighting Conference, pp. 353-362.
- [22] ICNIRP (2010). On protection of workers against ultraviolet radiation. <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUVWorkersHP.pdf>

## **10. Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Tucumán PIUNT E627, CONICET PUE 22920160100114CO y al PROGRAMA DE ARTICULACION Y FORTALECIMIENTO FEDERAL DE LAS CAPACIDADES EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA COVID-19.

# Planteamiento del procedimiento de laboratorio para la calibración de una luminaria LED para transmisión de datos con modulación por corrimiento de color (CSK)

Juan F. Gutiérrez<sup>1,a</sup>, Leonardo E. Bermeo<sup>2,b</sup>, Jesús M. Quintero<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Electrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Electrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Electrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia

<sup>a</sup> [jufgutierrezgo@unal.edu.co](mailto:jufgutierrezgo@unal.edu.co), <sup>b</sup> [lbermeoc@unal.edu.co](mailto:lbermeoc@unal.edu.co), <sup>c</sup> [jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co),

**Resumen**—La comunicación con luz visible es una tecnología de comunicación inalámbrica la cual ha venido desarrollándose durante las últimas dos décadas. Algunos de los esquemas de modulación compatibles para este tipo de comunicación utilizan constelaciones de puntos de cromaticidad las cuales mejoran la eficiencia espectral de la transmisión. La modulación por corrimiento de color está basada en una constelación de puntos sobre el espacio de color CIE 1931, la ubicación de la cromaticidad o coordenada CIE(x,y) de cada punto está determinada por un estándar y se generan por la fuente que transmite, normalmente mediante un sistema RGB. La calibración de una luminaria para este tipo de modulación es un procedimiento en el cual se debe configurar y verificar que cada uno de los puntos cromáticos cumplen con las coordenadas CIE(x,y) definidas en la constelación. Lo anterior hace necesario llevar a cabo mediciones espectrales de alguna variable fotométrica como luminancia o iluminancia. En este documento se presenta un método de laboratorio para llevar a cabo el procedimiento de calibración de una luminaria LED RGBW para transmisión de datos, utilizando una modulación por corrimiento de color de 16 puntos. Este método de laboratorio incluye el desarrollo de un prototipo de luminaria LED capaz de generar los 16 puntos de cromaticidad, además del desarrollo de un software de medición espectral para la validación de cada punto. Finalmente se comprobó el correcto funcionamiento del sistema planteado.

*Palabras clave.* Comunicación con luz visible, Modulación por Corrimiento de Color

## 1. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas en el espectro visible son conocidas como comunicación con luz visible, VLC por sus siglas en inglés. Esta tecnología utiliza fuentes de luz de estado sólido, mayoritariamente fuentes LED, para llevar a cabo la transmisión de los datos. Visto desde el modelo de comunicación, la fuente de luz LED desempeña el papel de la antena que permite la radiación y posterior propagación del campo electromagnético [1]. Debido a la alta demanda en la aplicación de dispositivos LED en sistemas de iluminación interior y exterior, trabajos académicos, así como algunos productos comerciales han sido desarrollados utilizando VLC. Dentro de las áreas de aplicaciones que han sido exploradas

están los sistemas de posicionamiento interior, comunicación entre vehículos y la infraestructura, zonas donde las comunicaciones por radiofrecuencia RF son prohibidas, comunicaciones submarinas y satelitales y redes inalámbricas de área local WLAN [2]. En cada una de estas áreas de aplicación, el VLC presenta ventajas respecto a las típicas comunicaciones por RF, y enfrenta desafíos para su aplicación. Algunos de estos desafíos son las limitaciones de uso del espectro óptico debido al ancho de banda del LED, los comportamientos no lineales del circuito de control de corriente en el LED, el diseño de nuevos esquemas de modulación para el mejoramiento de la eficiencia espectral en la comunicación y la disminuir el impacto de la comunicación en los parámetros de desempeño fotométricos y colorimétricos de las luminarias [3].

El esquema de modulación del VLC define la forma como la información es representada en un parámetro de la propagación del campo, por ejemplo, la amplitud y la frecuencia. La modulación por corrimiento de color CSK (Color Shift Keying) utiliza cambios en el color emitido por la luminaria para representar cadenas de bits; estos cambios de color son cuantificados sobre espacio de color CIE(x,y) 1931 [4]. Una luminaria LED debe tener la capacidad de cambiar el punto de cromaticidad CIE(x,y) 1931 para poder implementar la modulación CSK, y la cantidad de puntos de color que pueda emitir define los puntos de la constelación de la modulación. El documento IEEE 802.15.7 define tres tipos de modulación CSK de 4 puntos, 8 puntos y 16 puntos denominadas 4-CSK, 8-CSK y 16-CSK respectivamente [5]. Para llevar a cabo el cambio de cromaticidad son utilizadas luminarias LED-RGB, las cuales combinan estas tres componentes para variar el punto CIE(x,y) 1931 emitido. Ya que este esquema es basado en constelación de puntos, presenta eficiencias espirales mayores al esquema On-Off OOK y al esquema por variación de posición de pulso VPPM, presentados en el mismo documento.

Según sea el punto CIE(x,y) 1931 de cada una de las componentes LED-RGB, los puntos de la constelación son definidos por el documento normativo IEEE 802.15.7, de manera que la luminaria debe ser calibrada y ajustada, de manera que se garantice que los puntos emitidos por la luminaria cumplen con la normatividad. En este documento se presenta un método de laboratorio para llevar a cabo el procedimiento de calibración y ajuste de una luminaria LED RGB para transmisión de datos, utilizando una modulación por corrimiento de color de 16 puntos. Para esto fue implementado un prototipo de luminaria VLC y un sistema de administración de espeñómetros para medición de la luminaria. Se comprobó el correcto funcionamiento de la modulación 16-CSK, así como comportamientos no lineales en el driver para corriente de alimentación cercanas altas.

## 2. Metodología de Diseño de la Modulación CSK

### A. Planteamiento de los fundamentos de la modulación CSK

El principio de funcionamiento de la modulación CSK se basa en el cambio del punto de cromaticidad CIE(x,y) 1931 emitido por una luminaria LED. Cada uno de los puntos de cromaticidad emitidos representarán una cadena de bits de longitud determinada. El documento normativo IEEE 802.15.7 define tres esquemas a partir de este principio: 4-CSK, 8-CSK y 16-CSK. El valor numérico que acompaña el acrónimo CSK define el número de puntos CIE(x,y) que utiliza la modulación en cada caso. De esta manera, cuatro puntos de cromaticidad podrán transmitir cadenas de dos bits, con 8 puntos CIE(x,y) transmitir cadenas de 3 bits y con 16 puntos CIE(x,y) cadenas de 4 bits. En [IEEE] se presentan las reglas de diseño para cada una de las 3 modulaciones, las cuales definen las parejas ordenadas CIE(x,y) de la constelación de puntos de la modulación. Para producir cada uno de los puntos de la constelación se utiliza la combinación de tres componentes LED-RGB [5].

En la Fig. 1, se muestra un ejemplo de la constelación 16-CSK presentada originalmente en el documento normativo. Las bandas i,j,k representan los puntos de cromaticidad de los componentes RGB , respectivamente. Las bandas ijk varían según el dispositivo LED que sea utilizado y los puntos o símbolos CSK irán distribuidos según las bandas ijk. Para presentar las reglas de diseño que rigen la modulación 16-CSK, en la Fig. 2 es mostrada la constelación a partir de un triángulo equilátero. Los vértices del triángulo (IJK) son los puntos CIE(x,y) de las componentes RGB en la luminaria. Los símbolos S0 a S15 son los 16 símbolos de la modulación. S5, S10 y S15 son definidos por las longitudes centrales y definen los vértices sobre el espacio de color. S2 y S8 dividen los segmentos del triángulo JK en tres partes iguales. S3 y S12 dividen el segmento IJ en tres partes iguales. S11 y S14 son puntos que dividen el KI en tres partes iguales. El símbolo S0 es el centroide del triángulo IJK. S1, S4, S6 S9 son los centroides de los diferentes pequeños triángulos en los cuales se encuentran [6].

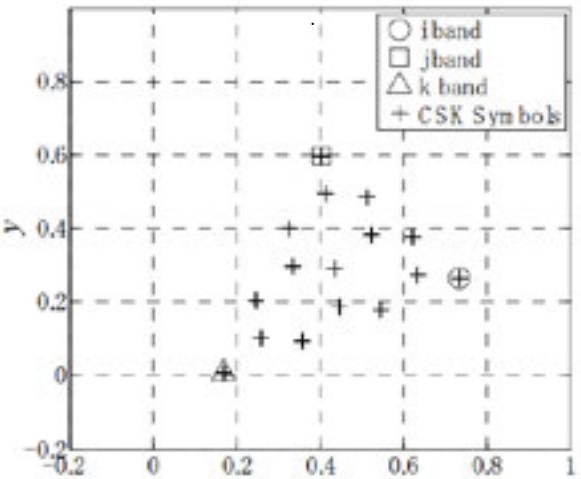


Fig 1: Ejemplo de constelación 16-CSK.

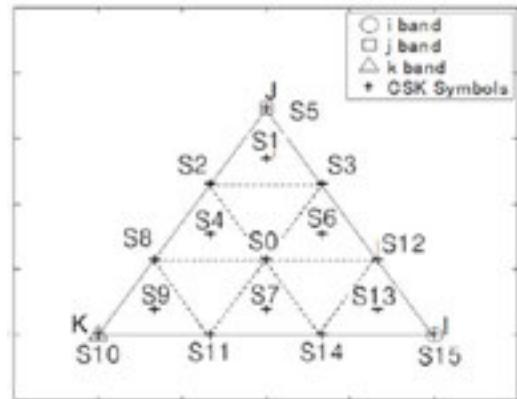


Fig 2. Reglas de diseño para la modulación CSK

La modulación CSK debe cumplir la siguiente restricción: cada uno de los puntos CIE(x,y) de la constelación tiene el mismo flujo luminoso radiado. Esta restricción es planteada mediante las siguientes expresiones [4]:

$$[x_d \ y_d] = [P_i \ P_j \ P_k] \cdot \begin{bmatrix} x_i \ y_i \\ x_j \ y_j \\ x_k \ y_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_i + P_j + P_k = 1 \quad (2)$$

El punto de cromaticidad  $[x_d \ y_d]$ , son las coordenadas del punto generado a partir de la combinación de los puntos de cromaticidad de las bandas IJK,  $[x_i \ y_i; \ x_j \ y_j; \ x_k \ y_k]$ . Los valores  $[P_i \ P_j \ P_k]$  representa el valor de flujo luminoso emitido por cada una de las componentes RGB, y normalizando estos valores, la sumatoria de  $P_i$ ,  $P_j$  y  $P_k$  será siempre igual a 1. Esta última condición implica que es posible mantener el mismo

flujo luminoso así el punto de cromaticidad este en constante cambio.

### B. Implementación de la Infraestructura VLC

Para llevar a cabo la metodología de calibración de la modulación 16-CSK, fue implementada una luminaria LED-RGBW la cual cumplió el papel de transmisor VLC. En la Fig. 3 se muestra la arquitectura de la luminaria diseñada; la luminaria VLC es basada en el microcontrolador CC3200 el cual permite programar un convertidor digital-analógico DAC para poder fijar un voltaje a la entrada del driver, y en este último la corriente en cada uno de los canales RGB. En la Fig. 3 es mostrado el circuito del driver para un canal, de manera que este circuito es reproducido para los tres canales. La luminaria tiene la capacidad de ser programa de manera inalámbrica a partir del acceso a un servidor web; esta característica fue diseñada para la automatización de las mediciones durante el proceso de calibración.

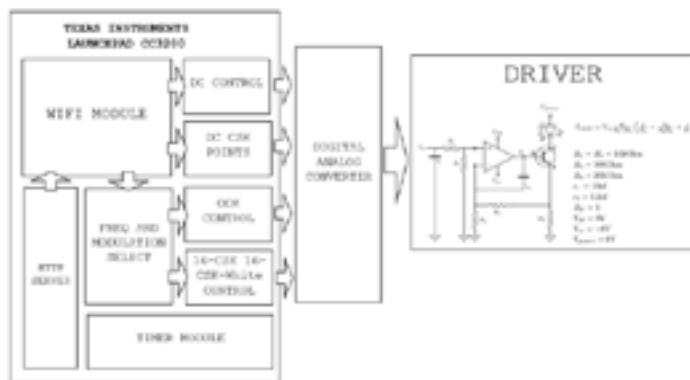


Fig 3: Arquitectura de la luminaria VLC

### C. Implementación de Software para medición espectral

Las mediciones de las cantidades fotométricas y colorimétricas del transmisor VLC son llevadas a cabo con espectrofotómetros. La caracterización de la luminaria conlleva un conjunto de mediciones espectrales que, de manera manual podrían demandar una cantidad de tiempo considerable. Con el fin de reducir el tiempo del procedimiento de calibración, las mediciones son automatizadas con un software que permite la administración de espectrómetros Ocean Optics utilizando el entorno de desarrollo Matlab. En la Fig. 4 se presenta la interfaz del software diseñado.



Fig 4: Interfaz gráfica del software para medición de la luminaria VLC.

### D. Definición de la Variable Fotométrica

El procedimiento de laboratorio sobre la luminaria VLC que se presenta en este documento, tiene como objetivo comprobar que las coordenadas CIE(x,y) de cada uno de puntos de la modulación cumplen las reglas de diseño presentadas en documento normativo, así como la restricción de flujo luminoso constante de cada uno de los puntos de la constelación. Aunque la normatividad define al flujo luminoso como variable fotométrica, es posible medir otra variable fotométrica que sea más conveniente y que permita verificar la restricción de la modulación. La luminancia de una superficie iluminada con la fuente LED-RGB, fue escogida como la variable a medir debido a que el montaje de laboratorio de la medición es más sencillo que la medición de flujo luminoso. Teniendo esta variable definida, es posible plantear una relación entre la luminancia medida, las coordenadas CIE(x,y) minúsculas y las coordenadas CIE(X,Y,Z) mayúsculas [4].

$$\begin{bmatrix} \frac{x_r}{y_r} & \frac{x_g}{y_g} & \frac{x_b}{y_b} \\ \frac{y_r}{y_r} & \frac{y_g}{y_g} & \frac{y_b}{y_b} \\ \frac{z_r}{y_r} & \frac{z_g}{y_g} & \frac{z_b}{y_b} \end{bmatrix} \cdot S_{iL} = L \begin{bmatrix} \frac{x_{id}}{y_{id}} \\ 1 \\ \frac{1-x_{id}-y_{id}}{y_{id}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

En esta expresión,  $S_{iL}$  representa un vector columna de dimensión 3 el cual contiene el valor de la luminancia de cada canal RGB para producir el punto  $i$  de la constelación. La variables  $(x_{id}, y_{id})$  son las coordenadas CIE(x,y) para el punto  $i$ . A partir de esta expresión es posible calcular el valor de luminancia que debe generar cada canal para producir un punto CIE(x,y) deseado.

### E. Montaje de Laboratorio y Calibración del Sistema de Medición

Una vez fue implementada el prototipo transmisor VLC y el sistema de medición espectral, se procedió al diseño del montaje y de laboratorio para llevar a cabo la calibración. En Fig. 5 se

muestra el montaje propuesto, en el cual se destacan el uso del espectrómetro con conexión a fibra óptica a un telescopio para la captación de la luminancia. Se utilizó también una superficie lambertiana (carta de color) sobre la cual se realizó la medición de luminancia. El PC con el software diseñado tiene la capacidad de controlar el punto de cromaticidad emitido por la luminaria vía Wifi, de manera que se evitara la intervención manual sobre la luminaria. La reflectancia de la superficie fue medida y caracterizada, de manera que a partir del valor de luminancia se pudo calcular la iluminancia sobre la superficie. Este montaje de laboratorio fue calibrado en longitud de onda y en amplitud, para este caso luminancia. La calibración en longitud de onda se realizó utilizando una bombilla de mercurio, y para luminancia se utilizó una esfera integradora con una salida de luz de luminancia espectral conocida.

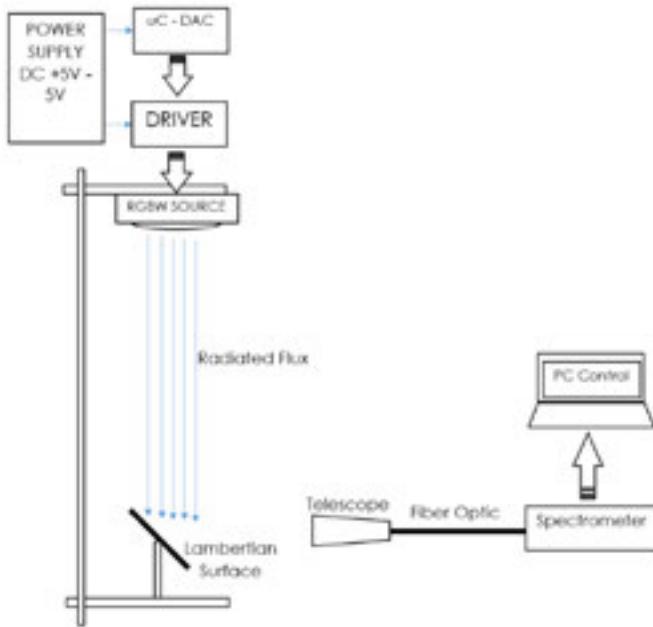


Fig 5. Montaje de laboratorio para la calibración CSK.

#### F. Procedimiento de Laboratorio

Con el montaje de laboratorio propuesto para la medición de la luminancia, se diseñó un procedimiento de laboratorio para poder realizar la calibración de la luminaria. Este procedimiento se explicará desde el diagrama de flujo mostrado en Fig. 6. Una vez calibrado el montaje, se inició con la **caracterización de estabilidad** de cada uno de los tres canales RGB. Una vez la luminancia sobre la superficie era alcanzada, se procedió con la caracterización de la luminancia de cada canal, versus la variable de control del sistema, o el **fitting dac-luminancia**. La variable de control fue definida como el valor digital decimal con el cual es controlado el DAC. Una vez hallada la relación DAC-Luminancia, se procedió a la **caracterización xyY de longitudes centrales**, donde fueron medidas las coordenadas colorimétricas de cada uno de los canales RGB para obtener un valor de luminancia igual en todos los canales. Esta medición permitió definir las coordenadas de los vértices del triángulo de la constelación CSK. La validación de esta medición se realizó

a partir de la varianza de 5 mediciones en cada canal. Una vez conocidas las coordenadas de los vértices de la constelación, fue realizado el **cálculo de los puntos de la constelación a partir de las reglas de diseño presentadas en el documento normativo, seguido el valor de luminancia en cada canal para cada punto, y por último el valor decimal DAC en cada canal**. Obtenida la matriz de programación para la constelación deseada, se realizaron las **mediciones de desempeño csk y su validación metrológica**. Finalmente, bajo condiciones de transmisión de datos, se determinó el **desempeño promedio fotométrico y colorimétrico de la luminaria**.

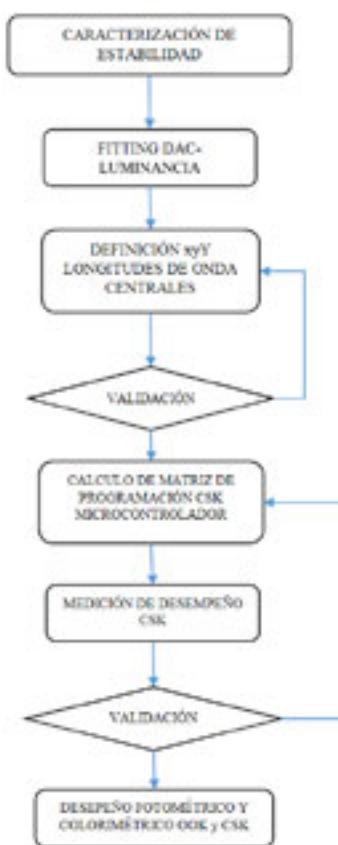


Fig 6. Procedimiento de laboratorio para la calibración CSK.

### 3. Resultados y Análisis

#### G. Fitting DAC-Luminancia, Definición de Longitudes Centrales

Cada uno de los canales de la luminaria RGB, fue caracterizado respecto al valor decimal de programación del DAC (variable de entrada), y la luminancia sobre la superficie lambertiana (variable de salida). En Fig. 7 se muestra la gráfica de esta caracterización, a partir de la medición de 4 puntos, desde el valor de cero hasta un aproximado de  $6.5 \text{ cd/m}^2$ . Cada punto fue medido 5 veces, de manera que el punto final fue el promedio de estos cinco puntos. A partir de estos 4 puntos, fue realizada una regresión lineal, la cual permitió hallar la relación DAC/Luminancia; en la Tabla 1 se muestra los resultados de

esta regresión. De esta manera, a partir de la tabla 1, si se conoce el valor de luminancia que debe emitir el canal, es conocido el valor que debe ser programado en el DAC.

Esta caracterización permitió comprobar el comportamiento lineal del sistema, desde las dos variables globales que incluyen el comportamiento del convertidor digital analógico, el driver de corriente controlado por voltaje y los LED RGB. La caracterización se realizó en el intervalo  $0\text{-}6.5 \text{ cd/m}^2$  debido a que, para valores mayores a  $6.5\text{cm}^2$  el canal R empezaba a presentar comportamiento no lineal, asociados a las corrientes de saturación del dispositivo. Para el caso de los canales G y B, esta no linealidad se presentaba para valores de luminancia más grandes, de manera que el canal R limitó el valor de luminancia de la modulación. La luminancia para la modulación fue definida en  $6\text{cd/m}^2$ , y a partir de este valor se caracterizaron las coordenadas CIE(x,y) para cada canal y son mostradas en la Tabla 2. A partir de estas coordenadas fueron calculados los otros 13 puntos de la constelación con base en las reglas de diseño del documento normativo. Utilizando la ecuación 3, fueron calculados los valores de luminancia de cada canal para producir cada uno de los 16 puntos. Por último, los valores de luminancia fueron convertidos mediante la relación DAC-Luminancia a los valores decimales digitales, dentro de una matriz de  $16\times 3$  en el lenguaje de programación C++ utilizando para la programación del microcontrolador. La matriz de programación es mostrada en la Fig. 8. Una vez obtenida la matriz fue programada en el microcontrolador para las mediciones de desempeño de la modulación CSK.

Tabla 1. Relación entre el valor decimal del DAC y la luminancia en cada canal RGB.

Canal	DAC - Luminancia
R	$0.0022 \frac{\text{cd/m}^2}{\text{decimalDAC}}$
G	$0.0084 \frac{\text{cd/m}^2}{\text{decimalDAC}}$
B	$0.0032 \frac{\text{cd/m}^2}{\text{decimalDAC}}$

Tabla 2. Relación entre el valor decimal del DAC y la luminancia en cada canal RGB.

Canal	x	y
R	0.688	0.312
G	0.201	0.719
B	0.122	0.117

#### H. Caracterización del Desempeño de la Modulación

Fueron llevadas a cabo mediciones colorimétricas a partir de la variable fotométrica de luminancia. Cada uno de los puntos colorimétricos y de la luminancia es un promedio entre 5 mediciones del mismo punto, de manera que se reportó desviación estándar de los 16 puntos de cromaticidad respecto a la luminancia emitida, así como el

error respecto al punto de cromaticidad deseado. Debido a los parámetros de configuración del espectrómetro para tener una buena medición de la luminaria, el tiempo de integración utilizado fue configurado en 0.9 segundo, de modo que la luminaria conmutaba los puntos de cromaticidad a una frecuencia cercana a 1Hz, de manera que esta medición no fue en condiciones de transmisión de información.

En la Fig. 9 se muestra el reporte de estos datos. Inicialmente se resalta que los valores de luminancia para cada uno de puntos o símbolos denominadas desde S0 a S15, mantienen una luminancia muy cercana a las  $6\text{cd/m}^2$ , valor definido durante la caracterización de cada uno de los canales. Las desviaciones estándar están por debajo de las  $10 \text{ mcd/m}^2$  de manera que la modulación cumplió con la restricción de flujo luminoso constante en cada uno de los puntos de cromaticidad emitidos. En la parte izquierda, se presenta la distribución de los 16 puntos en el espacio CIE (x,y) 1931, y sobre cada uno de los puntos el error respectivo a el punto calculado de manera teórica a partir de las reglas de diseño. Este error es la distancia Euclíadiana entre dos coordenadas en el espacio. Se reporta una distancia mínima ( $D_{min}=0.057$ ), la cual representa el error que debe existir para equivocar el envío de un punto o símbolo. Al comparar los errores del punto emitido con el deseado, respecto a la distancia mínima se comprueba que el error de esta constelación es mucho menor a esta distancia evidenciando un buen desempeño.

Una vez caracterizada la constelación y dando un criterio de conformidad al desempeño de la misma, se realizaron mediciones promedio de la luminaria en condiciones de transmisión de datos. Estos datos son mostrados en la Tabla 3. Fueron medidos los valores de luminancia, índice de reproducción de color CRI y temperatura de color correlacionada CCT, para tres frecuencias de conmutación diferentes, en donde se evidenció una luminancia sobre la superficie un poco mayor a las  $6\text{cd/m}^2$  definidas en el diseño. Como se esperaba, esta luminaria presenta índices de reproducción de color muy bajos, ya que, el espectro radiado está conformado por componentes monocromáticas. Esto se presenta como un desafío o desventaja para la modulación CSK ya que, para aplicaciones en espacios interiores, este índice de reproducción de color debe estar por encima de 80, según lo reporta el Reglamento Técnico Colombiano RETILAP [7]. Para estas tres cantidades medidas, el cambio de frecuencia tiene un efecto muy leve, el cual se debe a la razón que existe entre la frecuencia de conmutación y el tiempo de integración del espectrómetro. Para frecuencias de conmutación bajas, la medición puede verse afectada por la aleatoriedad de la información transmitida, ya que, en el tiempo de integración definido, no se alcanzan a hacer una lectura de suficientes puntos, lo cual no cumple la condición de equiprobabilidad de aparición de cada uno de los símbolos o puntos de cromaticidad.

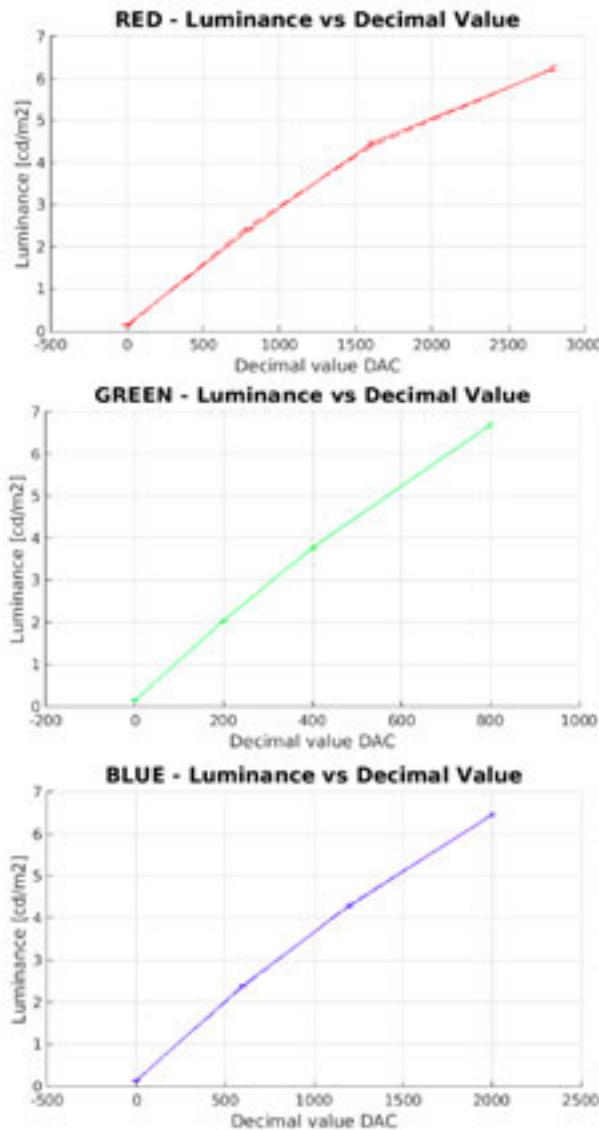


Fig 7. Comportamiento del transmisor VLC respecto al valor decimal DAC y la luminancia sobre la superficie [cd/m<sup>2</sup>].

```
const uint16_t Pijk[16][3] = {
  600, 455, 170,
  155, 645, 55,
  0, 657, 120,
  400, 590, 0,
  200, 558, 190,
  0, 711, 0,
  635, 480, 75,
  1130, 240, 315,
  0, 535, 360,
  360, 295, 700,
  0, 0, 1829,
  1310, 0, 705,
  1010, 385, 0,
  1600, 210, 115,
  2070, 0, 292,
  2800, 0, 0
};
```

Fig 8. Matriz de programación 16-CSK definida en C++.

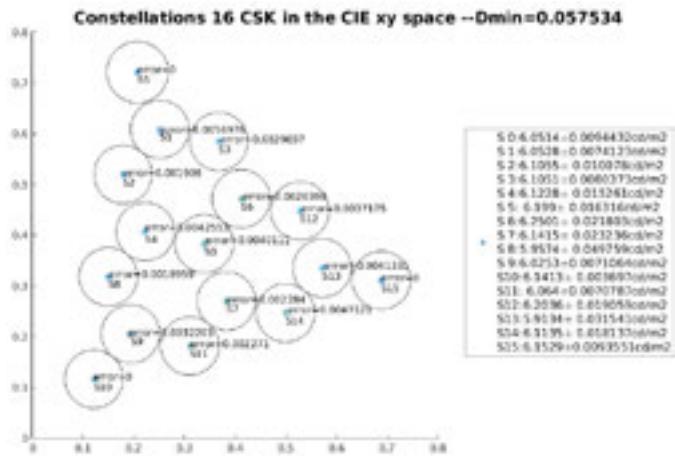


Fig 9. Desempeño de la Constelación 16-CSK

Tabla 3. Desempeño fotométrico y colorimétrico de la luminaria en condiciones de transmisión.

Freq [Hz]	Luminancia [cd/m <sup>2</sup> ]	CRI	CCT
100	6.15	45.92	5344.7
1000	6.17	45.95	5354.4
20000	6.08	46.18	5185.4

### 3. Conclusiones

Se construyó una infraestructura de transmisor VLC que permitió implementar la modulación 16-CSK con base en un microcontrolador, y un software de medición espectral que automatizó el proceso de medición para reducir el tiempo en la calibración. La metodología planteada para llevar a cabo la calibración de la luminaria CSK para una constelación de 16 puntos, permitió tener el desempeño definido por el documento normativo IEEE 802.15.7. La luminaria mantuvo una luminancia promedio aproximada de 6cd/m<sup>2</sup>, con variaciones muy pequeñas en esta cantidad fotométrica. De la misma forma, los puntos de cromaticidad emitidos cumplieron con las reglas de diseño formuladas en el documento normativo, reportando errores muy pequeños respecto a la distancia mínima de la constelación. Por otra parte, el uso de la modulación CSK implica índices de reproducción de color muy bajos, de manera que este esquema se imposibilita si se quiere aplicar en sistemas de iluminación general en espacios interiores, por lo tanto, se hace pertinente modificar este esquema para superar esta desventaja.

### 4. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden el que fueron referidas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la forma deseada de incluirlas.

- [1] Dimitrov, S., & Haas, H. (2015). Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi. Cambridge University Press.
- [2] O'Brien, D. C., Zeng, L., Le-Minh, H., Faulkner, G., Walewski, J. W., & Randel, S. (2008, September). Visible light communications: Challenges

- and possibilities. In 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (pp. 1-5). IEEE.
- [3] Elgala, H., Mesleh, R., & Haas, H. (2011). Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art. IEEE Communications Magazine, 49(9), 56-62.
- [4] Monteiro, E., & Hranilovic, S. (2014). Design and implementation of color-shift keying for visible light communications. Journal of Lightwave Technology, 32(10), 2053-2060.
- [5] Rajagopal, S., Roberts, R. D., & Lim, S. K. (2012). IEEE 802.15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. IEEE Communications Magazine, 50(3), 72-82.
- [6] Roberts, R. D., Rajagopal, S., & Lim, S. K. (2011, December). IEEE 802.15. 7 physical layer summary. In 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps) (pp. 772-776). IEEE.
- [7] Ministerio de Minas y Energía. Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público. “<https://www.minminas.gov.co/retilap>”. Colombia, 30 de Marzo 2010.

## 5. Biografías

**Juan F. Gutiérrez**, Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia. En 2019 recibió el título como Magíster en Telecomunicaciones de la misma universidad. Trabajó como Investigador en el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología Innovación durante 2016 y 2017. Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en comunicaciones ópticas inalámbricas en el marco del programa de excelencia doctoral del Ministerio de la Ciencia.

**Leonardo Bermeo C. PhD**, Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magíster en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Río de Janeiro. Experto en Sistemas de Automatización y Control para sistemas digitales y analógicos, así como en Tratamiento de Señales.

**Jesús M. Quintero PhD**. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista y Especialista en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Telemática de la Universidad de los Andes, Doctor en Ingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya. Experto en el área de Iluminación, Energías Renovables y en sistemas de Electrónica de Potencia. De igual manera, es experto en la caracterización de variables cuantitativas y cualitativas asociadas al funcionamiento de sistemas ópticos y de iluminación.

# Análise do projeto de iluminação pública da Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Maruípe

Luísa Galimberti Pires Martins<sup>1,a</sup>, Joicy Araujo da Silva<sup>2,b</sup>, Ricardo Nacari Maioli<sup>3,4,c,d</sup>

<sup>1</sup> FAESA - Faculdades Integradas São Pedro

<sup>a</sup> [luisagpmartins@gmail.com](mailto:luisagpmartins@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>b</sup> [joicyaraajo.s@hotmail.com](mailto:joicyaraajo.s@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>4</sup> FAESA - Faculdades Integradas São Pedro

<sup>c</sup> [ricardo.maioli@ufes.br](mailto:ricardo.maioli@ufes.br)

<sup>d</sup> [ricardo.nacari@faesa.br](mailto:ricardo.nacari@faesa.br)

**Resumo**— A busca pela eficiência energética é crescente no mundo devido ao impacto ambiental causado pela produção de energia elétrica. No campo da arquitetura e do urbanismo, o estudo da iluminação é importante para que edificações e cidades se tornem mais sustentáveis e a tecnologia LED auxilia no alcance desse objetivo. Este trabalho visa avaliar o impacto do novo projeto luminotécnico para o Campus de Maruípe da UFES, que substitui lâmpadas de vapor metálico por LED e acrescenta luminárias em áreas críticas, não iluminadas. Foi analisada a atual situação das condições de iluminação do campus, selecionando novos equipamentos a serem utilizados e em seguida foram feitas simulações no software DIALux para verificar o atendimento à demanda de otimização do sistema. Comparando a potência instalada hoje com a proposta pelo projeto, obtém-se uma redução de 57% da energia consumida por esse sistema no campus, além da melhoria de qualidade lumínica das vias.

**Palavras-chave:** eficiência energética, projeto luminotécnico, iluminação pública, qualidade lumínica, LED.

**Abstract**— The search for energy efficiency presents itself as an increasingly global issue due to the environmental impact caused by electric energy production. Relating to architecture and urbanism, illumination studies are important to make buildings and cities more sustainable and LED technology can help to achieve this goal. This article objects to evaluate the impact of the new lighting project granted to the Federal University of Espírito Santo, Maruípe campus, that replaces the metallic gas lamps by LED and supplements with luminaires in critical areas, without lighting. The actual situation of the lighting conditions on campus has been analyzed, selecting new equipment to be used and followed by simulations on DIALux software, to verify the attendant to the system optimization demand. Comparing the actual installed power with the project's proposal, it is obtained 57% of reduction on energy consumption, in addition of the paths' lighting quality improving.

**Key Words:** energetic efficiency, lighting project, public lighting, lighting quality, LED.

## 1. Introdução

A iluminação urbana é indispensável para a vida noturna das cidades, visto que contribui para a orientação de percursos, proporciona a utilização de áreas de lazer, destaca monumentos e paisagens e pode auxiliar na segurança pública [1]. A iluminação pública eficiente é aquela que, entre outros requisitos, chega de forma adequada onde é necessária, não desperdiça energia e nem gera grande impacto ambiental, proporcionando conforto e segurança à população [2]. No ambiente urbano é necessário ver e ser visto com clareza, tanto para pedestres como para veículos. Além disso é importante

que seja possível perceber obstáculos e que o indivíduo consiga se orientar no espaço público [3].

Na busca pela eficiência energética, uma das principais apostas atualmente é o Diodo Emissor de Luz (LED), tecnologia que permite alta iluminância com baixo consumo de eletricidade [4]. Diversas cidades já trocaram seu sistema de iluminação para LED e se tornaram modelos sobre como é possível iluminar maiores áreas com menor gasto de energia [5]. Além disso, o LED proporciona melhor qualidade visual e maior sensação de segurança aos usuários devido a sua temperatura de cor mais fria que as lâmpadas de vapor metálico (HID), tipo facilmente encontrado nas cidades [5]. Segundo pesquisa de Trapano et al. [6], apesar de muito usuais, as lâmpadas HID apresentam desvantagens como alto fator de depreciação e limitação tecnológica. Por estes motivos, num estudo comparativo feito pelos autores, o resultado é favorável ao uso do LED, que garante maior economia de energia e reduz custos de manutenção.

A tecnologia de vapor metálico é a utilizada atualmente no Campus de Maruípe da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), que abriga as instalações do Hospital Universitário Cassiano Antonio Moraes (HUCAM), além de edificações de laboratórios e salas de aula. Áreas livres como caminhos para pedestres, estacionamentos, acessos aos prédios e vias para veículos motorizados são iluminadas por postes de diferentes alturas e lâmpadas HID com potência de até 400 W. Além disso, devido a degradação pela ação do tempo e falta de manutenção adequada, houve a necessidade de se resolver com urgência alguns pontos mais críticos do campus, mal iluminados, em prol da segurança dos usuários. Entretanto, essa medida paliativa provocou outros problemas.

A partir do cenário de precarização das condições lumínicas, observou-se a necessidade da elaboração de um novo projeto que atendesse com qualidade as áreas externas do campus, compostas por calçadas, passarelas e vias, e que propusesse um menor gasto da Universidade com o sistema de

iluminação. Embasado na NBR 5101<sup>[7]</sup>, o projeto desenvolvido propõe a otimização da iluminação de todo o campus com a tecnologia LED, a partir da substituição de equipamentos danificados e pouco eficientes e da implementação de novas luminárias. Projetado com auxílio do *software* de simulação DiaLUX<sup>[8]</sup>, o novo sistema de iluminação visa proporcionar maior segurança aos frequentadores do espaço, com alta eficiência energética e redução de impactos ambientais.

## 2. Parte técnica do artigo

O método de desenvolvimento do trabalho é dividido em três etapas: o levantamento de dados, a elaboração do projeto luminotécnico e a comparação dos resultados estimados pelo projeto com o sistema instalado atualmente no campus. O atendimento ao sistema foi feito de acordo com a destinação de uso (pedestres, veículos ou estacionamento) e a largura das vias encontradas.

### A. Levantamento de dados

A análise da atual situação em que se encontra o sistema instalado foi desenvolvida a partir de visitas em campo com registro fotográfico, análise de mapas e demais plantas técnicas disponíveis do campus. Na verificação in loco foram conferidas as posições e quantitativo de postes e luminárias, a fim de mapear todo o sistema de iluminação instalado. As distâncias entre os postes foram analisadas por meio da planta baixa e conferidas em campo conforme necessidade.

Foram identificadas diversas anomalias no levantamento das instalações, a começar pela insuficiência quantitativa. É comum encontrar trechos como o apresentado na Fig. 1a, sem qualquer tipo de iluminação no percurso, o que influencia na sensação de insegurança dentro do campus.



Fig. 1. Área sem iluminação (a), luminária quebrada (b), poste alto iluminando copas de árvores e com refletores complementares (c), iluminação apenas com refletores (d)

Observou-se a existência de luminárias quebradas (Fig. 1b) e difusores opacos, que são problemas decorrentes da falta de

manutenção preventiva adequada. Além disso, verificou-se a ocorrência de patologias como a obstrução da distribuição de luz pela arborização (Fig. 1c) e a complementação do sistema com o uso de refletores, que geram poluição visual e luminosa, além de ofuscamento nos usuários (Fig. 1d).

No levantamento foi identificada a instalação desses refletores, em maior número que as luminárias, em pontos distintos do campus. Essa solução foi adotada com o objetivo de iluminar, mas sem o devido planejamento, áreas cuja iluminação se apresentava deficiente ou inexistente. Parte do problema ocorre devido à falta de atualização do sistema de iluminação pública, que não acompanhou o crescimento do campus com o passar dos anos. Posto isso, foram instalados projetores com lâmpadas HID de 400 W, fixados em postes, árvores e fachadas de edifícios, cujo modelo utilizado é pouco eficiente e consome muita energia e não tem bom controle de facho de luz.

Os dados do sistema instalado foram levantados por meio de visitas em campo e verificação de projetos existentes, com consultas às informações técnicas das luminárias instaladas, a fim de verificar as informações contidas nos projetos e complementá-los com dados recentes. Logo, obteve-se a relação de projetores e luminárias referentes à circulação de pedestre, veículos e dos estacionamentos (Tabela 1). Por fim, realizou-se a atualização dos projetos referentes ao sistema instalado para auxiliar na verificação das características, bem como no desenvolvimento da nova proposta.

Tabela 1. Relação das luminárias e projetores presentes atualmente nas vias com circulação de pedestres e veículos da UFES, Campus Maruibe

	Altura da luminária (m)	Nº total de luminárias	Potência por luminária (W)	Potência instalada por tipo (kW)
Circulação de pedestres	3-4	34	70	2,38
	7	6	250	1,50
	12	2	400	0,08
	Projetores	67	400	26,80
	Potência total instalada (kW)			30,76
	Altura da luminária (m)	Nº total de luminárias	Potência por luminária (W)	Potência instalada por tipo (kW)
Circulação de veículos	7	39	250	1,75
	12	16	400	6,40
	Projetores	68	400	27,20
	Potência total instalada (kW)			35,35

### B. Elaboração do projeto luminotécnico

A elaboração do projeto de iluminação externa do campus ocorreu através das seguintes etapas fundamentais:

- Levantamento de informações;
- Verificação dos requisitos mínimos de iluminação pública proposto pela norma pertinente;
- Definição das luminárias a serem instaladas;
- Simulações do novo projeto por meio do software DIALux 4.13, de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 5101<sup>[7]</sup>, e posterior análise dos dados obtidos;
- Simulação do projeto completo.

Para melhor atender aos requisitos, de realizar simulações objetivas, foram estudadas as distâncias médias e máximas entre os postes. Em seguida, analisou-se as características físicas das instalações e os possíveis casos de obstrução por arborização, com base em visitas e fotografias em horários diurnos e noturnos.

Para identificar os tipos de vias a fim de consultar os requisitos da NBR 5101<sup>[7]</sup> considerou-se para as vias motorizadas o fluxo de veículos em horários normais e de pico. Desse modo, esse tipo de via é classificado como V4 de vias locais com volume de tráfego médio. Para essa classe de via, são estabelecidos pela norma 10 lux de iluminância média mínima e 0,2 de fator de uniformidade mínimo. As vias de pedestres foram classificadas com volume de tráfego médio, também em razão do aumento do fluxo de uso em determinados horários, e por serem de uso moderado, definem-se como P3 na classificação da norma. Para essa classe de via, a norma estabelece 5 lux de iluminância média e 0,5 para fator de uniformidade mínimo. A referida norma ainda estabelece 1 lux sobre a superfície da via para permitir o mínimo de orientação nesses espaços.

Para a malha de cálculo a ser utilizada nas simulações, a norma indica a quantidade de pontos a serem utilizados para verificar se o sistema atende aos requisitos de iluminância estabelecidos. Para as vias destinadas aos veículos, são determinados 17 pontos paralelos e 5 transversais à via. Como o campus não apresenta padronização de larguras nas vias de veículos, considerou-se o valor mínimo predominante de 6m e o máximo de 10m para assegurar a qualidade do atendimento. Uma vez que essas vias possuem faixa dupla de rolamento, foram acrescidos 5 pontos, obtendo, portanto, 10 pontos na transversal. Da mesma forma foi realizada a medição para as vias de pedestre de 3m de largura, posto que possuem iluminação própria.

Abaixo está representada o esquema da malha de cálculo (Fig. 2) onde:  $S_{gl}$  é a distância longitudinal entre cada ponto;  $S_{gt}$  é a distância transversal;  $S$  é a distância entre cada poste e  $fr$  a largura da faixa de rolamento. Para os trechos de vias de 6 m de largura,  $S_{gl} = 2,35$  m e  $S_{gt} = 0,6$  m; para os trechos de vias de 10 m de largura,  $S_{gl} = 2,5$  m e  $S_{gt} = 1,0$  m; e para as vias de 3 m de largura,  $S_{gl} = 1,125$  m e  $S_{gt} = 0,6$  m.

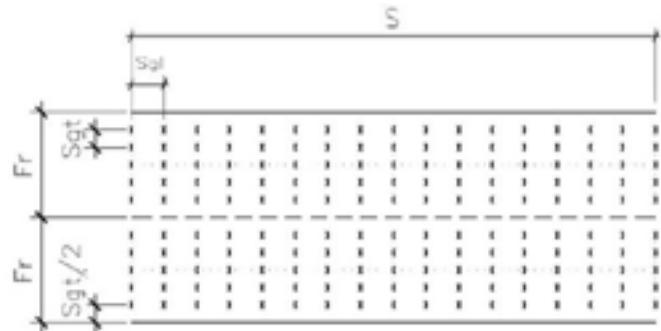


Fig. 2. Malha de cálculo para verificação detalhada<sup>[7]</sup> (adaptada)

A fim de selecionar as luminárias, reuniu-se os produtos de alguns dos principais fabricantes que atendessem aos requisitos do projeto. Os modelos foram simulados em um trecho típico de cada tipo de via e tabelados para serem comparados e avaliados segundo o atendimento à norma pertinente (Gráfico 1). Por fim, foi classificado um modelo para cada destino de uso (vias de pedestre, vias de veículos motorizados e estacionamento). Tais modelos não só atenderam aos requisitos estabelecidos, como também tiveram o pior desempenho dentre os simulados dos demais fabricantes, a fim de comparar os valores de potência com os modelos instalados no campus (Tabela 2).

Gráfico 1. Comparação entre os resultados das luminárias analisadas para vias motorizadas, calçadas e estacionamentos

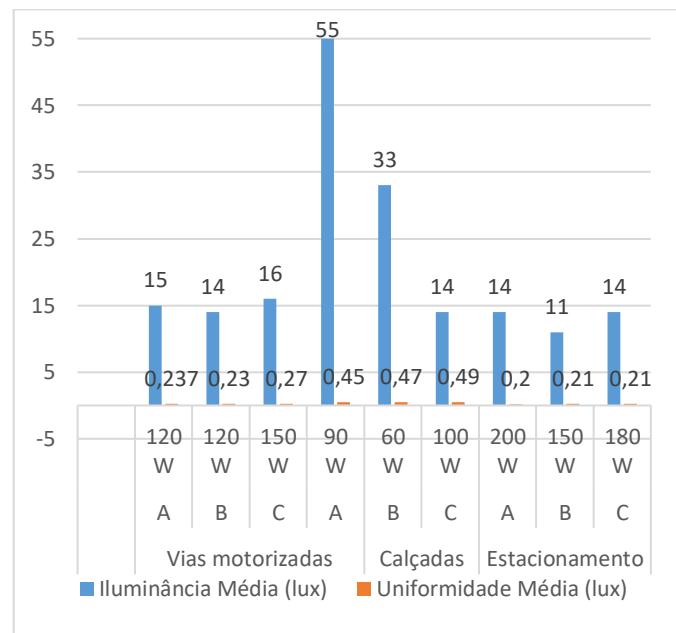


Tabela 2. Comparação entre a potência das luminárias selecionadas para a simulação e das existentes - UFES campus Maruípe

Altura de montagem	3m	4m	5m	7m	12m
Luminárias selecionadas (LED)	-	60W	60W	60W	119,4 W
Luminária Existente (HID)	70W	70W	-	-	250 W
					400 W

Foram realizadas simulações de trechos das vias de cada tipo no DIALux de acordo com as distâncias reais levantadas em campo para verificar se o novo sistema atenderia aos requisitos e avaliar a necessidade de implantação de novos postes. Nas simulações considerou-se cada situação específica de modo que o novo sistema pudesse atender a demanda por completo. Para os trechos de vias de veículos e dos estacionamentos, foram exploradas diferentes configurações de instalação das luminárias.

Em contrapartida, para as vias de pedestre, tendo em vista a baixa quantidade de postes, desconsiderou-se as distâncias existentes entre os postes e foi preciso testar a distância máxima que atenderia aos requisitos. Assim, definiu-se um padrão de distância entre eles. Por fim, as simulações resultaram em dados de iluminância média mínima geral e por ponto e fator de uniformidade mínimo, referente a cada situação de instalação configurada.

Após a definição dos modelos de luminárias, foi realizada a simulação completa do projeto a fim de analisar seu atendimento diante das situações reais de instalação como a presença de edificações, vegetação e curvas. Conforme detectadas as falhas no atendimento, cada situação foi corrigida e a simulação repetida.

#### C. Análise dos resultados de projeto

Feitas as simulações dos trechos de vias no software DialUX, foram obtidas as malhas de pontos e níveis de cinzento para as diferentes larguras de vias. A Fig. 3 apresenta esses resultados para vias de 3 m destinadas a pedestres e de 6 m e 10 m destinadas à circulação motorizada, respectivamente.

Esse dado de saída do software expõe os valores de iluminância observados nos pontos de medição previamente determinados entre dois postes de luz. O resultado aponta que o valor mínimo obtido foi de 9,63 lux nas calçadas de 3 m, 1,98 lux nas vias de 6 m e 5,71 lux nas vias de 10 m, suprindo os requisitos especificados na norma<sup>[7]</sup>.

O gráfico com os níveis de cinzento facilita a visualização da distribuição da luz na via, identificando as áreas do trecho simulado que possuem maior ou menor iluminância. Nos três trechos é possível identificar uma distribuição diferente da luz,

mas com as maiores iluminâncias registradas próxima à posição das luminárias.

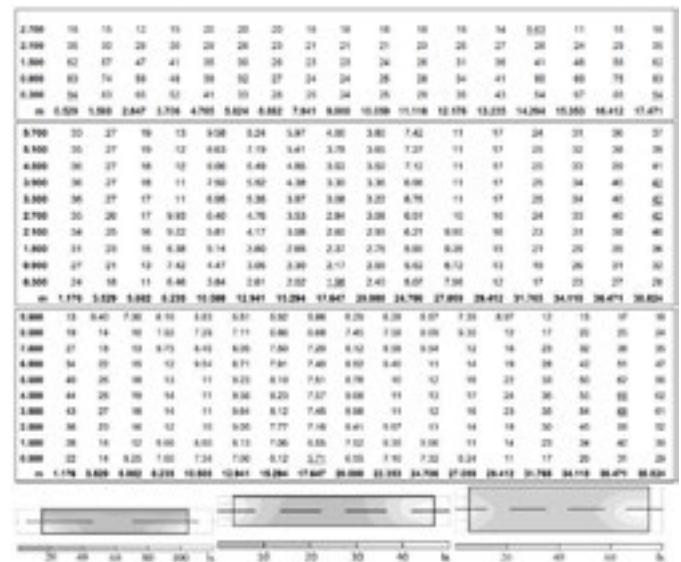


Fig. 3. Malhas de pontos e de níveis de cinzento dos três trechos típicos simulados para calçadas, via motorizada de 6m e 10m, respectivamente

#### D. Análise das simulações do projeto

À medida em que eram feitas as simulações, analisava-se possíveis falhas de iluminação, propondo melhorias para o projeto, até que fosse alcançado um resultado satisfatório. As Fig. 4 e 5 mostram, respectivamente, a distribuição da iluminação por representação em cores falsas que o projeto propõe para as vias de pedestres e automóveis, além de uma representação 3D de um trecho do campus. A partir da avaliação gráfica das cores falsas nos trechos simulados, obtém-se uma análise mais aproximadas das distintas situações existentes no projeto, a fim de identificar possíveis deficiências. Os trechos das vias de pedestres foram simulados separadamente da iluminação das vias de circulação motorizada com o intuito de se evitar interferência dos sistemas e um possível mascaramento de falhas na distribuição da luz.

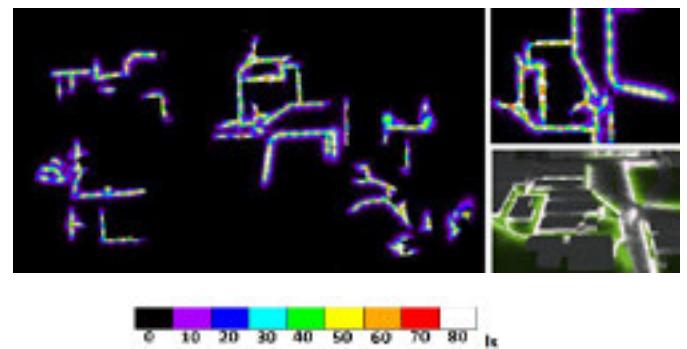


Fig. 4. Simulação do projeto luminotécnico das vias de pedestres

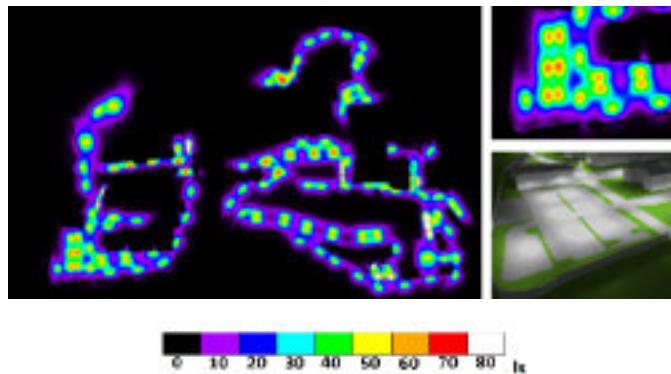


Fig. 5. Simulação do projeto luminotécnico das vias de transporte motorizado

Entre equipamentos a serem trocados e luminárias adicionadas, o projeto é concluído com o quantitativo apresentado na Tabela 3 a seguir. A previsão do projeto é que a potência instalada seja de 9,83 kW nas vias de pedestre, enquanto hoje o total é de 30,76 kW. Nas vias de tráfego motorizado, projeta-se 18,38 kW instalados, contraponto os 35,35 kW da situação atual.

Tabela 3. Relação das luminárias do projeto a serem instaladas nas vias com circulação de pedestres e veículos da UFES, Campus Maruípe

Circulação de pedestres	Altura da luminária (m)	Nº total de luminárias	Potência por luminária (W)	Potência instalada por tipo (kW)
	4	141	60	8,46
Circulação de veículos	5	1	60	0,06
	7	1	60	0,06
<b>Potência total instalada (kW)</b>		<b>9,83</b>		
Circulação de veículos	Altura da luminária (m)	Nº total de luminárias	Potência por luminária (W)	Potência instalada por tipo (kW)
	4	6	60	0,36
	5	2	60	0,12
		7	250	1,75
	7	63	250	15,75
	12	1	400	0,4
<b>Potência total instalada (kW)</b>		<b>18,38</b>		

Além disso, o projeto não considera mais a instalação de projetores, pois podem fornecer condições insatisfatórias de iluminação, com possibilidade de ofuscamento, se instalados em condições similares às encontradas atualmente. Retirando-

se todos os projetores existentes hoje no campus, a potência instalada será reduzida em 54 kW.

Com os dados de potência elétrica instalada antes e após implementação do projeto, calculou-se a energia elétrica consumida com finalidade de iluminação pública nas duas situações, de acordo com equação (1). Considerou-se a média de 12 h de funcionamento por dia, durante 30 dia ao mês. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 4.

$$E = P * t \quad (1)$$

Tabela 4. Relação de potência e energia elétrica da iluminação pública da UFES campus Maruípe

Cenário	Situação Atual	Projeto Elaborado
Potência elétrica instalada (kW)	66,11	28,21
Energia elétrica consumida por dia (kWh)	793,32	338,52
Energia elétrica consumida por mês (kWh)	23.799,6	10.155,6

Verifica-se que a implementação do projeto elaborado gera economia de 57% no consumo de energia elétrica do campus de Maruípe com iluminação pública das áreas externas, o que corresponde a 13.644 kWh por mês. De posse desse dado, é possível calcular a economia mensal que a administração da Universidade Federal do Espírito Santo pode fazer com a redução da verba gasta com energia elétrica no campus, economizando esses recursos aos cofres públicos.

Conforme indicado em estudo realizado em outro campus da referida universidade [9], o retorno do investimento para instalação do sistema pode acontecer em tempo muito inferior à vida útil do sistema, tornando o empreendimento economicamente viável e necessário. A economia do estudo atual poderia ser maior, como no caso da investigação realizada para o campus de Goiabeiras, visto que, ainda hoje, muitas regiões do campus de Maruípe se encontram com iluminação precária ou inexistente.

### 3. Conclusões

Diante do estudo da situação atual do campus de Maruípe da UFES e da intervenção proposta pelo novo projeto luminotécnico, é possível destacar o impacto energético da substituição e complementação do sistema lumínico com luminárias LED.

Considerando que as especificações do projeto serão cumpridas, conclui-se que a redução no consumo de energia elétrica para vias de tráfego de veículos motorizados será de

48%, enquanto nas vias destinadas a pedestres essa redução chega a 68%.

Além disso, o estudo realizado destaca a importância da análise da qualidade lumínica no meio urbano, com atenção aos diferentes tipos de vias e seus usos específicos, para atender às necessidades dos usuários. A partir das patologias identificadas *in loco* e consequente ineficiência do sistema atual, é evidenciada a necessidade de substituição das luminárias, que atualmente geram sensação de insegurança.

Por fim, conclui-se que o novo projeto auxilia na redução da poluição luminosa e é eficiente energeticamente, através do uso da tecnologia LED, ainda que seja aumentado o número de luminárias instaladas. Dessa forma, a economia financeira atribuída à aplicação do projeto pode ser direcionada a outras necessidades da Universidade e da sociedade.

#### 4. Referências

- [1] MASCARÓ, Juan Luís; MASCARÓ, Juan José. Iluminação pública e arborização urbana. In.: MASCARÓ, Lucia (organizadora). A iluminação do espaço urbano. 1<sup>a</sup> edição. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006.
- [2] KIRSCHBAUM, Carlos. A iluminação eficiente de cidades: um enfoque globalizador. In.: MASCARÓ, Lucia (organizadora). A iluminação do espaço urbano. 1<sup>a</sup> edição. Porto Alegre: Masquattro Editora, 2006.
- [3] MANZANO, Eduardo R. A iluminação artificial do recinto urbano. In.: MASCARÓ, Lucia (organizadora). A iluminação do espaço urbano. 1<sup>a</sup> edição. Porto Alegre: Masquattro Editora, 2006.
- [4] PEÑA-GARCÍA, A.; HURTADO, A.; AGUILAR-LUZÓN, M.C. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. Safety Science, nº 78, 2015, p. 142-148.
- [5] REITZ, Ricarch. Lights Ahead: Rejuvenating Detroit Starts with Street Illumination. Roads & Bridges (Des Plaines, III.). V55, n 8, p. 54-57 ago. 2017.
- [6] TRAPANO, P.; GÓIS, A.; GUIMARÃES, T.; BENEDETTO, G. Estudo comparativo entre as tecnologias de iluminação LED e vapor metálico (HID) 250W em pistas de abastecimento de postos de serviços. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XII., 2013, Brasília. Anais [...]. Brasília, 2013.
- [7] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5101: Iluminação Pública: Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.
- [8] DIAL GMBH, DIALux. Versão 4.13. [North Rhine-Westphalia]: DIAL, c2016.
- [9] SILVA, J. A.; MARTINS, L. G. P.; PIGNATON, E. G.; MAGALHÃES, F. D.; MAIOLI, R. N. O impacto da substituição do sistema de iluminação pública da universidade federal do espirito santo. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído – ELACAC, João Pessoa, 2019, Anais...João Pessoa, XV ENCAC/XI ELACAC, 2019.

#### 5. Biografias

Luísa Galimberti Pires Martins cursa graduação em Arquitetura e Urbanismo na FAESA - Faculdades Integradas São Pedro, e já estudou Engenharia Elétrica. Se dedica às pesquisas relacionadas à iluminação artificial desde 2018 e possui artigo publicado na área.

Joicy Araújo da Silva, Técnica em Edificações, cursa graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Espírito Santo. Auxiliou na elaboração de projeto de iluminação pública e se interessa pelo campo de iluminação e percepção do usuário.

Ricardo Nacari Maioli, Arquiteto e Urbanista, Mestre em Engenharia Civil, componente do quadro técnico de arquitetos da Universidade Federal do Espírito Santo e docente da graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAESA - Faculdades Integradas São Pedro.

# Human circadian monitoring: preparing an iot challenge at brazilian antarctic station

Marins, D.P.A<sup>1,a</sup>, Lazaro, R.C.<sup>1</sup>, Garcia, A.S.<sup>1</sup>, Segatto, M.V.<sup>1</sup>, Alvarez, C.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>a</sup> [daniela.pawelski@gmail.com](mailto:daniela.pawelski@gmail.com)

**Resumo**— This article reports an experiment using Internet of Things (IoT) devices to measure health parameters, such as heart rate and sleep monitoring. In the experiment, it was tested the performance of the Mi Band 3 with 4 volunteers monitored for 46 days. The objective was to identify the challenges and create solutions to develop a methodology that will be the basis of a health monitoring system to be applied at the Comandante Ferraz Antarctic Station (EACF), which belongs to Brazil. This system will provide data and information to support further decisions regarding the architectural elements that interfere with the quality and quantity of light and its impact on people's life quality and health. Thus, the results presented in this paper show a data analysis performed on the four volunteers, as well as what types of trials and requirements might be encountered. As main result, a methodology was proposed aiming to solve obstacles and encounters identified in the process.

Key Words: IOT, Antártica, light analyses, human monitoring.

## 1. Introduction

Today human's comfort depends on many variables: light, thermal, ergonomic, functional, etc. The influence of the constructed built environment as an artificial space, leads human activities to an increase of controlled atmospheres turning off from nature contact [1],[2].

As well-known, quality of life related with light is a constant search for the human being and the focus of many scientific researches, including the field of medicine [3], engineering [4] and psychology [5]. The current technology, equipment can be helpful to awareness individual choices on life quality and propose options to adjust the physiological body needs to the rush of routine contemporary lifestyle. There are an infinity subjects that can drive human wellness and this study is part of a research of how light influence can change people life's quality [6], [7].

Thus, the present project works with equipment and methodologies to monitor the interface between human behavior and environment in order to provide a better quality of life to the people. For the monitoring experiments, it will be applied IoT (Internet of Things) wearable devices, which presents efficient measurements without much interferences on human comfort or activities. The results initially obtained will be related with a specific environment variable of comfort: the indoor light distribution.

This work goal is to establish a methodology to evaluate equipment and its IoT architecture for human monitoring at remote locations, by an IoT environment. With this study we intend to facilitate the topology and equipment decisions,

understand and avoid primary mistakes and orientate the following phases for a functional system.

## 2. Background and motivation

Light influence the human body behavior. Scientific studies collected evidences that light affects human in various ways, which can be divided in two groups: on its intensity and on its spectral composition [8]. There are many researches on how each band of the spectral composition of light interferes on cortex activation, Seasonal Affective Disorder (SAD), body temperature and behavior of human being [9]–[13]. This means that even daylight contact, or periods without light, or a constant contact with artificial light, with a particular color temperature or chromatic quality, can influence human direct or indirectly.

The spectral characteristic, the quantity of light or its intensity can also affect human body resulted from light exposure or suppression. In temperate zones, SAD is a very common mental disease caused by physiological consequences of natural light suppression. Studies treatment consist mostly in phototherapy exceeding light intensity even in artificial way directly at body [10], [11], [14], [15].

The circadian cycle also is proven to be directly influenced by light [16], [17]. Abstinence from natural light or the inappropriate use of morning light and its absence at night, based on natural available daylight or artificial complement, including all the variations as natural as possible, affect human personality, preferences and melatonin suppression, that consequently can cause sleep disorders [18]–[21].

Light incidence variations are very hard to predict. It is observed that human activity can vary, the available light can change and other habits, as food consumption, caffeine, stress, etc. Other factors may also interfere with the same hormones, such as age, humor, body temperature and behavior mentioned before that also influence humans physio and psychologically [22]–[25].

## 3. Related works

A smartwatch is a seemingly standard clock, with monitoring features that goes beyond simple tasks such as showing the time [26]. Today smartwatch are effectively wrist computers capable of tracking users all day and night activities.

With some devices built into the design of the well-known wristwatch, this equipment is already part of several monitoring studies in the medical area. They can help on accompanying the patient and informing the doctor or nurse of any changes pertinent to the treatment, as so, in situations of

surgeries and medications with possible side effects, where, on-time monitoring has been very successful [27],[28].

These types of watches can include functions like accelerometer, thermometer, altimeter, barometer, chronograph, GPS, and a number of diverse applications related to entertainment and monitoring [29]. However, this compact technology requires a software and professional accompaniment to translate all the data collected into responses for the human body, psychologically and physiologically.

Research evidences monitoring through the collection of information from internal and external sensors and has deepening into various medical areas pertinent to each need, such as: cardiovascular research, renal, stress related, hormonal problems, among many others [30],[31],[32].

#### 4. Proposed approach

As a trial version, this work simplified the devices communication, and, in partial path it is transmitted manually. Figure 1 illustrates the project setup plan and the total path of collected data.

In summary, the data path starts with a wearable IoT device Mi Band 3 (XIAOMI), used by four volunteers (V1, V2, V3 and V4), which serves to detect health parameters. This device uses Bluetooth Low Energy (BLE) 4.2 communication protocol to communicate with a smartphone, which permits data transmission with low energy, secure connection and bit rate close to 50Mbps.

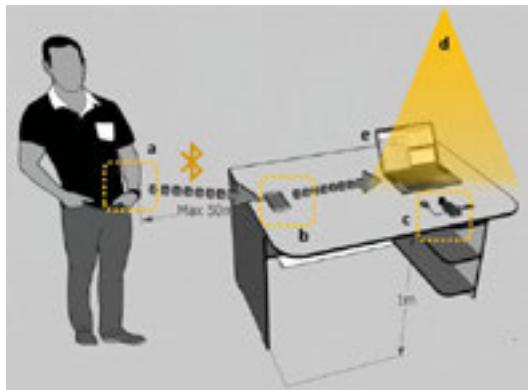


Figure 1. Illustration of the data path and equipment's (a) smartwatch, (b) smartphone, (c) lux meter, (d) ambient light, (e) laptop.

Sensors internal to the Mi Band 3 – such as heart rate sensor, accelerometer, proximity sensor and steps counts – allow the device to work with different health parameters, beside track sleep quality of the volunteer. The battery life of the device depends of the quantity of data are been collected. In this project experiment, it was verified that battery's life turns around 14 and 18 days.

With the collected data, the smartwatch connects per smartphone, with operational systems Android 4.4 or later and IOS 9.0 or later, by mean of Mi Fit app. After that, the data is collected by notebook, there it will be processed and analyzed.

Figure 1 shows also a lux meter thdl-400 (INSTRUTHERM), which measured incident light at the workspace with 75 cm high from the floor on each volunteer's desk, following ISO/ABNT procedures [33]. With all the system working, it was made the data collection, during 46 days. Those data contain heart rate and sleep tracking, which includes light sleep, deep sleep and sleep time. The analysis of the results was divided into two parts: profile survey of volunteers and data correlation.

The first part aim to helps in decision making of a volunteer relevance, that is, it helps to decide if data collected from volunteer will be useful or not to the research purposes. The second part of data analysis is related to the main goal of the work, it means: will be used a statistic method called Median Absolute Deviation (MAD) to find outliers in the data. According to [34], MAD is frequently applied to determines outliers because it needs little computation time, is very robust and has a simple explicit formula, given by

$$MAD = \text{medi} |x_i - \text{medi}(x_i)|, \quad (1)$$

where  $\{x_1, \dots, x_i\}$  are the elements and medi is the median of the  $i^{\text{th}}$  element on the sample set.

#### 5. Case study

The outcomes presented here are preliminary results for a remote monitoring system in Antarctic Brazilian Station, located in Antarctic Peninsula. For that reason, it will be documented in this paper all requirements and challenges found during this initial phase, in order to reduce problems in future works, and also be a guide for other similar works. Before that, this section will present the acting domain in Antarctic, and basic restrictions found in a project like this.

As mentioned before, the work domain is on the Antarctic Peninsula, in specific King George Island, at the Brazilian Antarctic Station "Comandante Ferraz" (EACF), shown in Figure 2. The geographical site difficulties include the distance that data have to track between the monitored users and the analyzer team. The main communication technology applied is satellite communication, which strongly depends on weather conditions to have a good performance.



Figure 2. Brazilian Scientific Station (Photo Basegroup 2019/2020).

Other specific matter about this study is the human isolation, which means users are far away for day-by-day life, civilizations, friends, family and home. It is noteworthy that preliminary results reported in this paper were obtained by volunteers in their normal urban life, making it difficult to simulate an environment as controlled as the EACF's environment. To minimize this problem, it was selected volunteers that shares the same workspace during five days of the week.

Besides that, the isolation that characterizes the EACF means that the system must work with as less maintenance as possible, technical problems must be avoided and comfort and wellness should be specific counting in this experience. Batteries and device functioning should not depend on users' mood, or interfere on its day-by-day activities at Antarctic station monitoring time.

Finally, the EACF it was constructed by a group of several containers, side by side, recovered by an outer wall of almost one meter of air in a metallic envelope. The consequences of these is that IoT devices, which uses wireless communication such as Bluetooth, can have a bad performance. Once that metal infrastructure strongly reflects wireless signal, the communication distribution inside the build must have redundant devices, which aim guarantee the integrity of data even with a heavy Intersymbol Interference (ISI) and connectivity losses.

## 6. Results and discussions

For this scientific use, the best cost-benefit device chosen to attend the project requirements was Mi Band 3. That choice leads to first experiment: a reliability test of the device.

For that, it was used a professional health parameter meter PRO 12 (PROLIFE) as reference sensor. In the experiment, all four smart wristbands were calibrated with concomitant measure with Pro 12 sensors, as shown in Figure 3. With both sensors correctly placed, the volunteers tried different positions and scenarios, simulating the different movements of the IoT device throughout the day.



Figure 3. Image of the measurements of calibration proof.

In Figure 3, the Mi Band placed in volunteer's wrist shows the heart rate of 76bps, while, at same time, PRO 12 shows the same value of measurement. The data collected shows that Mi Band 3 has a reliable performance for the project goal, with measured error under 3% during most time of the experiment and between 3% and 7% eventually when compared to the commercial health meter PRO 12.

There was detected the first problem parameter: volunteers must have same external interferences and pre-settled device. A challenge found in this part it was that volunteer V4 has no heart rate data storage, because the function was not pre-settled. Another question about V4 is that volunteer routine includes work in different places, which means it was not shared the same work environment as volunteers during the workdays. For that reason, V4 it was removed of the second part of the data analysis. Participants volunteer must have same routine and be monitored at a controlled environment to reduce variables and be able to correlates results and outliers.

Second difficulty which interferes research is that devices must synchronize automatically. Volunteer V2 has lost 17 days from 46 days of monitoring, resulted from Mi Band memory limitations, which, after 3 days overwrite data to free up storage space. The challenge found with this event is that, for future works, the synchronization must be done daily and automatically, without user's interference.

The second part of the data analysis aims to create a method that relates sleep tracking data with incident light in volunteer's routine. The first step for that it was to discriminate data, finding out what is outlier and what is not. Curves in Figure 4 shows the outlier points (red dots) detected with MAD technique in V1's data of "sleep time" and "hours slept". At Figure 4, the blue dots are the data used for linear regression.

A challenge of this work is to correlate light influence in sleep routine, eliminating outside influences. There are many other variables that can be the pivot of such influence in sleep time and quality, as food ingestion or stress situations. In V1, for example, outlier's data show that changes on sleep time influences directly on sleeping hours, as can be seen at day 1st, 5th, 9th, 10th, 16th, 22nd, 27th and 42nd (Figure 4).

Another point to be observed between the curves in Figure 4 is that they show an opposite relation between the hours slept and volunteer's bed time. This tendency was observed in all volunteers, and it means that outliers found in sleep time trends to be inversely proportional to the slept hours.

Figure 4 shows the measured points compiled at MATLAB program and it illustrates one possible way to analyze data. Perhaps data analyses can also be made by numerical tables, grouping the results in medium values which can be observed punctually by typology of measurement (Table 1).

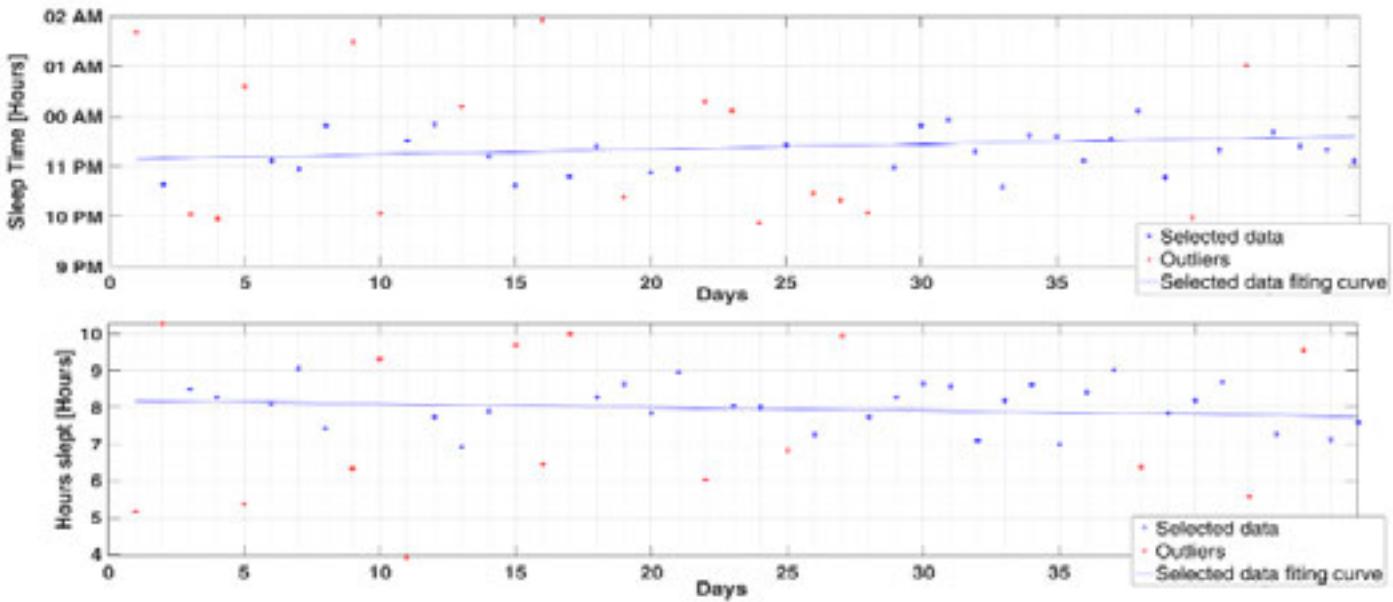


Figure 4. Result of the method of Linear Regression and Outliers Detection applied in volunteer's data - sleep time (upside) and Hours slept (bottom).

Table 1 presents some parameters used to create the volunteer's profile, in order to analyze them separately. It can be notice ambient light incidence at each individual workstation is very different, showing differences of more than 50 %. The heart rate differences should consider volunteer's age and life profile, if includes on their routine exercises, or even health food.

Each human bean has also its own life style preferences, some individuals are day or night style and this influences in parameter where data analyses consider the bedtime rate. It is reasonable that in a control environment where volunteers have the same activities and mealtime, those variances in number should reduce.

The percentage values between hours slept and sleep time are not clear in volunteer V2, nevertheless, V1 and V3 shows a correlation on numbers, presenting a very proximity outlier on both subjects.

The experiment found here is how to create a method that distinguish light influence from others parameters, for example, time to sleep. For that, a bigger number of data and volunteers is required, besides the need of a controlled environment, as it will work with EACF Station.

Table 1. Volunteers data.

Volunteer	Lux in the Desk (lm)	Heart rate (bpm)	Workday Sleep Time	Weekend Sleep Time	Outliers hours slept	Outliers Sleep time
V1	286	68.825	11:03PM	11:19PM	31.91%	34.04%
V2	346	61.962	10:59PM	00:33AM	13.21%	20.75%
V3	155	64.827	00:11AM	00:33AM	25%	21,67%

After all experiments, a new methodology can be developed. In Figure 5 is presented the final proposed methodology to be base of a health track system to be applied in EACF. In the figure, D1 represents a Raspberry Pi Zero W, that will be responsible to automatically synchronize all device's information by mean of Bluetooth and WIFI networks, represented in the figure for its respective symbols. To guarantee the data transmission and avoid ISI, one redundancy is added in each chamber. D2 is a TI Designs Multi-Standard CC2650 SensorTag, which should measure light quantity in lux and its placed around the building, once that the goal of the project is also relate light intensity with life quality. At indoor environment, volunteers wearing their Mi Band 3 (D3) will work and walk and, for that reason, extra devices are placed around there.

After that, all the data has to be sent to a base in Vitória-ES (Brazil). The challenge found here is that EACF has satellite internet, and so, it has many signals lost during daytime. To solve that, a database is proposed, where all information will be stored before goes to Brazilian's base. In this database, the internet stability will be tracked all the time and, when it gets stable, the data will be uplink to a cloud and then downloaded in Vitória, guaranteeing the data transmission faster as possible.

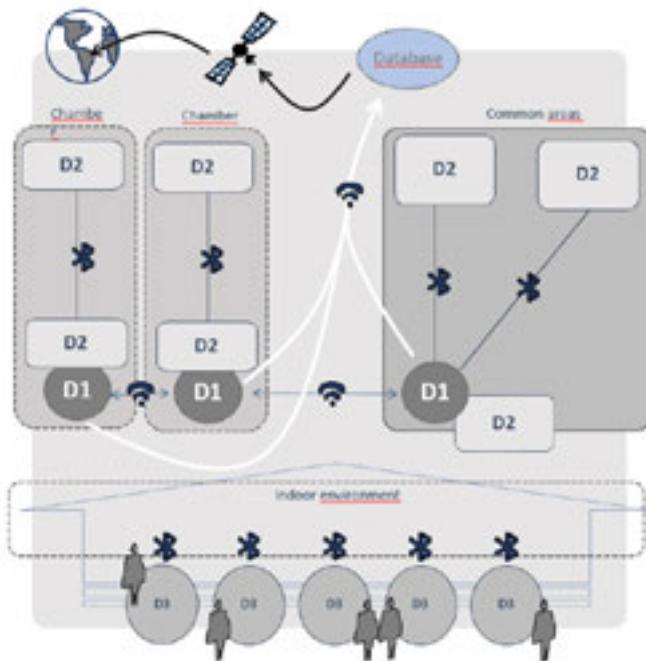


Figure 5. Schematic graph of the new methodology proposed to the future studies in Antarctica.

## 7. Conclusions and future works

This paper presented, in preliminary results, some challenges and requirements that can be found in a project which intend to use wearables IoT devices to track human's health parameters, such as sleep quality and heart rate. The experiments consisted of monitoring four volunteers for 46 days and preview what kind of challenges could appear. The results showed a good performance of smart wristband monitoring applied to track the health parameters, and what kind of problems can appear when users set the device's configuration.

On the data analysis, a statistic method called Median Absolute Deviation was applied to find outliers in the volunteer's data and then, define what kind of unexpected parameters, besides light intensity, can interfere in people's sleep quality. At the end, a new methodology to overcome all challenges found in this project is proposed.

Future works include the development of raspberry code which permits remote configuration and automatically synchronize devices' data, integrating D1, D2 and D3 shown in Figure 5. Besides that, some more volunteers' information must be collected, such as volunteer's health medical history, in order to create a volunteer's profile that permits to find more impact of light in their life. Done that, the new methodology proposed in this paper can be tested in a real environment, where new challenges can be find and so the proposed system improved.

## 8. References

- [1] S. Barbosa, K. Ip, and R. Southall, "Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin facade under tropical climate conditions: The influence of key design parameters," *Energy Build.*, vol. 109, pp. 397–406, 2015.
- [2] C. Marino, A. Nucara, and M. Pietrafesa, "Mapping of the indoor comfort conditions considering the effect of solar radiation," *Sol. Energy*, vol. 113, pp. 63–77, 2015.
- [3] S. Benedetto, A. Carbone, V. Drai-Zerbib, M. Pedrotti, and T. Baccino, "Effects of luminance and illuminance on visual fatigue and arousal during digital reading," *Comput. Human Behav.*, vol. 41, pp. 112–119, 2014.
- [4] M. Frascarolo, S. Martorelli, and V. Vitale, "An innovative lighting system for residential application that optimizes visual comfort and conserves energy for different user needs," *Energy Build.*, vol. 83, pp. 217–224, 2014.
- [5] B. Fabio, B. Chiara, L. Rosi, B. Laura, and F. Simonetta, "Non visual effects of light: an overview and an Italian experience," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 723–728, 2015.
- [6] Y. Selvi et al., "The effects of individual biological rhythm differences on sleep quality, daytime sleepiness, and dissociative experiences," *Psychiatry Res.*, vol. 256, no. April, pp. 243–248, 2017.
- [7] C. Cajochen, "Alerting effects of light," *Sleep Med. Rev.*, vol. 11, no. 6, pp. 453–464, 2007.
- [8] J. L. Souman, A. M. Tinga, S. F. te Pas, R. van Ee, and B. N. S. Vlaskamp, "Acute alerting effects of light: A systematic literature review," *Behav. Brain Res.*, vol. 337, no. September 2017, pp. 228–239, 2018.
- [9] A. Alkozei, R. Smith, and W. D. S. Killgore, "Exposure to blue wavelength light modulates anterior cingulate cortex activation in response to 'uncertain' versus 'certain' anticipation of positive stimuli," *Neurosci. Lett.*, vol. 616, pp. 5–10, 2016.
- [10] K. T. Stewart, J. R. Gaddy, B. Byrne, S. Miller, and G. C. Brainard, "Effects of green or white light for treatment of seasonal depression," *Psychiatry Res.*, vol. 38, no. 3, pp. 261–270, 1991.
- [11] B. I. Yerevanian, J. L. Anderson, L. J. Grota, and M. Bray, "Effects of bright incandescent light on seasonal and nonseasonal major depressive disorder," *Psychiatry Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 355–364, 1986.
- [12] M. te Kulve, L. J. M. Schlangen, L. Schellen, A. J. H. Frijns, and W. D. van Marken Lichtenbelt, "The impact of morning light intensity and environmental temperature on body temperatures and alertness," *Physiol. Behav.*, vol. 175, no. March, pp. 72–81, 2017.
- [13] S. Cho et al., "Blue lighting decreases the amount of food consumed in men, but not in women," *Appetite*, vol. 85, pp. 111–117, 2015.
- [14] D. H. Avery et al., "Dawn simulation and bright light in the treatment of SAD: A controlled study," *Biol. Psychiatry*, vol. 50, no. 3, pp. 205–216, 2001.
- [15] L. J. Grota, B. I. Yerevanian, K. Gupta, J. Kruse, and L. Zborowski, "Phototherapy for seasonal major depressive disorder: Effectiveness of bright light of high or low intensity," *Psychiatry Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 29–35, 1989.
- [16] J. Zhang, W. Qiao, J. T. Wen, and A. Julius, "Light-based circadian rhythm control: Entrainment and optimization," *Automatica*, vol. 68, pp. 44–55, 2016.
- [17] M. Engwall, I. Fridh, L. Johansson, I. Bergbom, and B. Lindahl, "Lighting, sleep and circadian rhythm: An intervention study in the intensive care unit," *Intensive Crit. Care Nurs.*, vol. 31, no. 6, pp. 325–335, 2015.
- [18] G. M. Cavallera and S. Giudici, "Morningness and eveningness personality: A survey in literature from 1995 up till 2006," *Pers. Individ. Dif.*, vol. 44, no. 1, pp. 3–21, 2008.
- [19] A. D. Galasius and J. A. Veitch, "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review," *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 728–742, 2006.
- [20] F. Beute and Y. A. W. de Kort, "Let the sun shine! Measuring

- explicit and implicit preference for environments differing in naturalness, weather type and brightness," *J. Environ. Psychol.*, vol. 36, pp. 162–178, 2013.
- [21] T. Kozaki, A. Kubokawa, R. Taketomi, and K. Hatae, "Effects of day-time exposure to different light intensities on light-induced melatonin suppression at night," *J. Physiol. Anthropol.*, vol. 34, p. 27, 2015.
- [22] C. Vetter and F. A. J. L. Scheer, "Circadian Biology: Uncoupling Human Body Clocks by Food Timing," *Curr. Biol.*, vol. 27, no. 13, pp. R656–R658, 2017.
- [23] S. M. T. Wehrens et al., "Meal Timing Regulates the Human Circadian System," *Curr. Biol.*, vol. 27, no. 12, pp. 1768–1775.e3, 2017.
- [24] J. H. Kim and J. F. Duffy, "Circadian Rhythm Sleep-Wake Disorders in Older Adults," *Sleep Med. Clin.*, 2017.
- [25] R. Bordet, "Système mélatoninergique, rythmes biologiques et troubles de l'humeur," *Encephale.*, vol. 32, no. 5, pp. 802–809, 2006.
- [26] D. Witt, R. Kellogg, M. Snyder, and J. Dunn, "Windows Into Human Health Through Wearables Data Analytics," *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, 2019.
- [27] D. Levine, J. Torabi, K. Choinski, J. P. Rocca, and J. A. Graham, "Transplant surgery enters a new era: Increasing immunosuppressive medication adherence through mobile apps and smart watches," *Am. J. Surg.*, 2019.
- [28] H. Kalantarian, N. Alshurafa, and M. Sarrafzadeh, "Detection of Gestures Associated with Medication Adherence Using Smartwatch-Based Inertial Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 4, pp. 1054–1061, Feb. 2016.
- [29] M. Kheirkhahan et al., "A smartwatch-based framework for real-time and online assessment and mobility monitoring," *J. Biomed. Inform.*, 2019.
- [30] A. W. Teh et al., "Smart watches for heart rate assessment in atrial arrhythmias," *Int. J. Cardiol.*, 2018.
- [31] M. R. Kamdar and M. J. Wu, "PRISM: A DATA-DRIVEN PLATFORM FOR MONITORING MENTAL HEALTH," *Pac. Symp. Biocomput.*, vol. 21, pp. 333–44, 2016.
- [32] Y. Okada, T. Y. Yoto, T. Suzuki, S. Sakuragawa, and T. Sugiura, "Wearable ECG Recorder with Acceleration Sensors for Monitoring Daily Stress\*: Office Work Simulation Study," *35th Annu. Int. Conf. IEEE EMBS*, 2013.
- [33] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "NBR ISO 8995-1\_Iluminação de ambientes de trabalho. Parte I interior." 2013.
- [34] Wu, Chunjie & Zhao, Yi & Wang, Zhaojun. (2002). The median absolute deviations and their applications to Shewhart (X)over-bar control charts. *Communication in Statistics- Simulation and Computation*. 2003.

## 9. Biografy

Daniela Pawelski Amaro Marins has a degree in architecture and urbanism and a master's degree in Civil Engineering, both from the Federal University of Espírito Santo and a master's degree in Master Architectural Lighting Design from the Hochschule Wismar University. He is currently a PhD student in the Electrical Engineering course at the Federal University of Espírito Santo

Renan Costa Lazaro has graduation at Electrical Engineering by Federal University of Espírito Santo and specialization at Entrepreneurship by Hanze University of Applied Sciences (2015). Currently is a master student at Federal University of Espírito Santo.

Anilton Salles Garcia has bachelor's at Mechanic Engineering from Federal University of Espírito Santo, master's at Mathematics from State University of

Campinas and doctorate at Electric Engineering from State University of Campinas. Has experience in Electric Engineering, focusing on Telecommunications.

Marcelo Eduardo Vieira Segatto has a degree in Electrical Engineering from the Federal University of Espírito Santo, a master's degree in Electrical Engineering / Communications from the State University of Campinas and a doctorate in Physics from the Imperial College of Science Technology and Medicine. He is currently Full Professor at the Department of Electrical Engineering, Federal University of Espírito Santo.

Cristina Engel de Alvarez has a degree in Architecture and Urbanism from the University of Vale do Rio dos Sinos, a master's and doctorate in Architecture and Urbanism from the University of São Paulo. Currently, in addition to being a full professor at the Federal University of Espírito Santo, she is also Secretary of State at the Secretariat of Science, Technology, Innovation and Professional Education of Espírito Santo.

# Plataforma de gestión del alumbrado público 4.0 en el marco del desarrollo sostenible

Mailin Nava<sup>Vepica, mailin.nava@vepica.com</sup>, Juan Pocaterra<sup>Vikua, jpocaterra@vikua.com</sup>

**Resumen**— Esta investigación tuvo como objetivo principal identificar las sinergias entre la gestión del alumbrado público y los ODS, soportada en el uso de la plataforma URBO® que utiliza las tecnologías GPRS y Wifi, a través de software inteligencia artificial (I.A.), para la realización de diagnósticos o auditorías energéticas, planificación, monitoreo y control. La gestión de los sistemas de alumbrado 4.0 es de vital importancia, permite soportar la toma de decisiones para la ejecución de un plan estratégico prospectivo, introduciendo como factor diferenciador e innovador la transformación digital mediante el uso de las tecnologías inteligentes exponenciales o disruptivas para satisfacer un nuevo perfil del ciudadano con conciencia de los ecosistemas del cual forma parte. Como resultado se encontraron las vinculaciones, contribuciones o aportes de la herramienta de gestión y explotación del alumbrado público de la plataforma URBO® con los ODS 3,7,9,11, 13,15.

*Palabras clave. Sostenibilidad, Gestión, Transformación digital, Alumbrado.*

## **Abstract.**

The main objective of this research was to identify the synergies between the management of public lighting and ODS, supported by the use of the URBO® platform that uses GPRS and Wifi technologies, through software and artificial intelligence (AI), to carry out diagnoses or energy audits, planning, monitoring and control. The management of the lighting systems 4.0 is of vital importance, it allows to support the decision making for the execution of a prospective strategic plan, introducing as a differentiating and innovative factor the digital transformation through the use of the exponential or disruptive intelligent technologies to satisfy a new profile of the citizen with conscience of the ecosystems of which he is a part. As a result, the links, contributions or contributions of the management tool and exploitation of public lighting of the URBO® platform with the ODS 3,7,9,11, 13,15 were found.

*Key Words. Sustainability, Management, Digital transformation, Lighting*

## **1. Introducción**

En la actualidad la transformación digital ha conllevado a una verdadera revolución de la sociedad, cada día se incrementa el uso de tecnologías disruptivas o exponenciales en todos los ámbitos. La monitorización, la gestión energética en tiempo real de los procesos industriales como en los servicios de las ciudades son determinantes para garantizar la sostenibilidad, el bienestar y la prosperidad de los ciudadanos; en este contexto el ecosistema energético está sufriendo cambios acelerados impulsados por los avances en la tecnología, la creciente preocupación por el medio ambiente, el cambio en el comportamiento de los consumidores, las nuevas políticas que exigen la ruptura de paradigmas para la creación de oportunidades en armonía con el desarrollo sostenible.

La gestión de los sistemas de alumbrado público (SAP) de las entidades municipales o ciudades, representa una significativa fuente de consumo de energía, también de gran impacto desde el punto vista de sostenibilidad del medio ambiente, debido a los residuos generados por las propias instalaciones, la contribución en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la contaminación lumínica e influencia en el crecimiento del hábitat de especies, la mejora del confort y salud pública de los ciudadanos. Las instalaciones presentan características particulares que unidas a la descentralización geográfica dificulta una adecuada gestión, existe así un elevado potencial de oportunidades para la eficiencia energética-socio-mediambiental en el diseño de las políticas de gestión de los sistemas de alumbrado.

Surgen entonces en la cuarta revolución industrial modelos de plataformas de gestión urbana que integran los ecosistemas energético, ambiental y social entre los que se encuentra la plataforma URBO®, desplegada bajo la modalidad software como servicio que comprende módulos destinados a optimizar: la Gestión de Residuos, Transporte Público, Operación y Mantenimiento, Tránsito, Riesgos ambientales y Alumbrado Público, esenciales para mejorar la calidad de vida del ciudadano.

Con base a lo anterior en alineación con el marco referencial de los Objetivos de Desarrollo Sostenible(ODS) para la Agenda 2030 aprobada en septiembre de 2015, por la Asamblea General de las Naciones Unidas, este estudio pretendió generar una aproximación teórica conceptual sobre las sinergias entre las plataformas de gestión del alumbrado público que emplean las tecnologías inteligentes utilizando como estudio de caso las bondades ofrecidas por la plataforma URBO® y los objetivos de desarrollo sostenible contemplados en la agenda 2030 de las Naciones Unidas.

## **2. Metodología**

La investigación fue de tipo documental-descriptiva, de diseño no experimental, transeccional realizada en el lapso comprendido entre marzo a mayo de 2020; la población estuvo conformada por la información bibliométrica relacionadas con las macrocategorías Desarrollo Sostenible y sistemas de gestión del alumbrado público 4.0, se procedió en primer término a la etapa de recolección de fuentes de información

primarias originales y secundarias referidas o derivadas, posteriormente se aplicó la técnica de revisión documental para finalmente realizar un análisis con enfoque cualitativo.

### 3. Fundamentación Teórica

#### A. Desarrollo Sostenible

Según la ONU (2015), la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015, por la Asamblea General de las Naciones Unidas, estableció una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Países Miembros que la suscribieron, incluyó 17 objetivos los cuales se muestran en la Fig. 1, con 169 metas, colocando a la igualdad - dignidad de las personas como prioridad, respetando el entorno ambiental y persiguiendo mejoras en la calidad de vida, que permitan satisfacer nuestras necesidades así como las necesidades de las generaciones futuras.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los ODS tienen la intención de aliviar la pobreza, la desigualdad, degradación climática y ambiental, para promover la prosperidad, la paz, la justicia; aunque cada uno de los diecisiete es importante, pero en el portal de la Organización de las Naciones Unidas, ONU (2018) declaran que el objetivo de lograr la energía asequible o limpia es especialmente importante ya que se interrelaciona con otros ODS. Varias organizaciones, municipalidades de diferentes países han implementado tradicionalmente sistemas de gestión de la energía para reducir el consumo de electricidad a través de otras fuentes de energía, para minimizar la emisión de gases de efecto invernadero gases (GEI).

Desde el eje transversal de la Sostenibilidad se pretende la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> acompañada de la transición energética al más bajo costo posible, equilibrando a su vez las potenciales amenazas en cuanto a la confiabilidad de las fuentes de energía, la seguridad climática, con la necesidad de recuperación económica mediante la rentabilidad sostenida. El desarrollo sostenible es la intersección de las dimensiones social, económica y medioambiental.

Desde el eje transversal de la sostenibilidad se pretende la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> acompañada de la transición energética al más bajo costo posible, equilibrando a su vez las potenciales amenazas en cuanto a la confiabilidad de las fuentes de energía, la seguridad climática, con la necesidad de recuperación económica mediante la rentabilidad sostenida. El desarrollo sostenible es la intersección de las dimensiones social, económica y medioambiental, tal como se muestra en la Fig. 2.



Figura 2. Dimensiones del Desarrollo Sostenible

#### B. Sistemas de Gestión del Alumbrado Público 4.0

Según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), la Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Norte América (I.E.S) y las normas venezolanas COVENIN de alumbrado sobre el diseño (3290-1997), el alumbrado público es un servicio público consistente en la iluminación de las vías públicas, parques públicos, y demás espacios de libre circulación que no se encuentren a cargo de ninguna persona natural o jurídica de derecho privado o público, diferente del municipio, con el objeto de proporcionar la visibilidad adecuada para el normal desarrollo de las actividades.

El proceso de auditoría energética a los sistemas de alumbrado público de los municipios, es una actuación del sistema de gestión de la energía de las instalaciones, la cual tiene su fundamentación normativa en la norma ISO 50001 sobre Sistemas de Gestión de la Energía, aprobada el 15 de junio del 2011 por la Organización Internacional de Normalización ISO, establece el marco procedimental para las instalaciones industriales, comerciales, institucionales, las instalaciones gubernamentales, y la totalidad de las organizaciones para administrar la energía, ésta es aplicable a organizaciones grandes y pequeñas, tanto en los sectores público como privado, en la fabricación y servicios, en todas las regiones del mundo.

De acuerdo Marimon y Casadesús (2017), esta norma fue diseñada con la estructura de otras normas que pertenecen a la familia ISO. Según Jovanovic y Filipovic (2016), presenta requisitos similares a los de la ISO 14.001 con respecto a la energía, eficiencia, y también ayuda a las organizaciones a lograr la certificación ISO 50.001, además, puede utilizarse como guía para desarrollar, supervisar e introducir iniciativas

de mejora de la eficiencia energética. Sin duda alguna, la ISO 50.001 ayuda a las organizaciones a mejorar su imagen corporativa, a reducir el impacto ambiental asociados a sus operaciones de producción, al tiempo que se reducen los costos y se mejora la competitividad.

Los sistemas de alumbrado público de las entidades municipales, representan una significativa fuente de consumo de energía. La explotación de instalaciones de alumbrado presenta características particulares que unidas a la descentralización geográfica del alumbrado público dentro de un mismo municipio dificultan una adecuada gestión. Por lo anteriormente expuesto existe un elevado potencial de ahorro energético en el diseño de las políticas de gestión de los sistemas de alumbrado.

También otro aspecto importante en la gestión de los sistemas de alumbrado público es su gran potencial desde el punto vista de sostenibilidad y ecoeficiencia debido a los factores contraproducentes asociados a los mismos; como son las emisiones de CO<sub>2</sub> la contaminación lumínica, los residuos generados por las propias instalaciones, la contaminación lumínica e impacto en el crecimiento de hábitat de especies animales y vegetales.

Para Manzano (2009) autor clásico destacado en gestión y explotación del alumbrado público de la escuela Luz y Visión de la Universidad de San Miguel de Tucumán, afirman que el mayor efecto de las instalaciones de alumbrado sobre el ambiente no actúa en forma aislada, generalmente están vinculadas, por ejemplo, factores contraproducentes como: la polución lumínica debido a una innecesaria emisión de flujo luminoso hacia el cielo produce un derroche de energía con una consecuente emisión de CO<sub>2</sub>. Reducir el consumo en el alumbrado público optimizando las instalaciones reduce la emisión de CO<sub>2</sub>. Cuando la iluminación de espacios urbanos produce una dispersión de luz innecesaria hacia el cielo, ocurren una serie de efectos, algunos cuantificables y otros todavía inciertos.

Generalmente malos diseños, la selección de luminarias inapropiadas, excesivos niveles de iluminación o utilización en períodos con reducida contemplación por parte del público son el origen de la polución lumínica. Así pues, el diseño de los componentes debe evitar la emisión de luz innecesaria hacia el hemisferio superior de las luminarias bajo los parámetros descritos en el informe de la CIE 126-1997<sup>10</sup>, referente hacia las directrices para la minimización del brillo al cielo.

IDEA (2010), indica que uno de los objetivos dentro de la gestión del alumbrado público en línea con Manzano (2009) es la limitación del resplandor luminoso y la contaminación lumínica. Vinculado al concepto de contaminación lumínica MCL (2010) refiere que ésta constituye un despilfarro de

energía que produce graves perjuicios de tipo económico, afecta negativamente a la atmósfera, daña la biodiversidad, perturba a la ciudadanía, provoca inseguridad vial e impide la contemplación y disfrute del patrimonio cultural que es el cielo estrellado.

Por otra parte, el empleo de componentes en los sistemas de alumbrado público, los cuales al final de su vida útil constituyan un residuo de bajo impacto ambiental o de alto impacto ambiental pero reciclables (cuando no haya otra alternativa mejor) serán los más indicados a utilizar.

También el follaje de los árboles que crece continuamente bajo la iluminación, puede que sea mayor en tamaño, más susceptibles a la contaminación atmosférica y al estrés hídrico durante la temporada de cultivo, debido a que los poros estomáticos en las hojas permanecen abiertos durante períodos más largos. Hay una grande sensibilidad de los árboles leñosos a la luz artificial. Los árboles altamente sensibles deben evitarse en las zonas urbanas de alta iluminación donde se empleen lámparas con longitudes de onda ricos en rojo e infrarrojo.

En el mismo reden de ideas el alumbrado urbano de luz blanca altera el hábitat y el comportamiento de los insectos. En climas subtropicales el efecto es muy notorio por la gran presencia de insectos. Por otra parte, produce molestias a las personas que permanecen o transitan cerca. Si además el cierre de las luminarias es pobre, se convierte en una trampa de insectos que obstruye la emisión de luz y reduce las condiciones de iluminación.

MCL (2010) refiere que la necesidad de la implementación de medidas para lograr la sostenibilidad medioambiental es de carácter urgente, no solo por los elevados índices mundiales de contaminación atmosférica, sino también por el hecho de que la humanidad ha evolucionado tecnológicamente, esta evolución debería haberse acompañado con medidas preventivas para evitar llegar a este punto del calentamiento global.

Otro aspecto relevante en la gestión de los SAP de acuerdo a la normativa CIE S 026/E:2018, se refiere a su influencia en los ciclos circadianos o la vida de las personas que viene definido como los cambios físicos, mentales y conductuales que en un ciclo de 24 horas responden a la luz u oscuridad del ambiente en que se desenvuelve un organismo, por ejemplo, dormir en las noches o estar despierto en el día. En las ciudades inteligentes los SAP deben ser diseñados no solo para ser eficientes energéticamente o en emisiones sino para la adecuación de la temperatura de color sumado a fotometrías adaptadas a cada necesidad, que produce una mejora en el confort que repercute en salud pública de toda la sociedad en la transición hacia la noche.

En síntesis, la gestión de los SAP de las entidades municipales o ciudades, representa una significativa fuente de consumo de energía, también de gran impacto desde el punto vista de sostenibilidad del medio ambiente, debido a los residuos generados por las propias instalaciones, la contribución a reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la contaminación lumínica e influencia en el crecimiento del hábitat de especies, la mejora del confort y salud pública de los ciudadanos. Las instalaciones presentan características particulares que unidas a la descentralización geográfica dificulta una adecuada gestión, existe así un elevado potencial de oportunidades para la eficiencia energética-socio-mediambiental en el diseño de las políticas de gestión de los sistemas de alumbrado.

#### C. Plataforma para Gestión del Alumbrado Público 4.0. URBO®

URBO®, es una plataforma de gestión urbana que integra los ecosistemas energético, ambiental y social entre los que se despliega bajo la modalidad software como servicio que comprende módulos destinados a optimizar: la Gestión de Residuos, Transporte Público, Operación y Mantenimiento, Tránsito, Riesgos ambientales y Alumbrado Público, esenciales para mejorar la calidad de vida del ciudadano. Posee un módulo para a Gestión del Alumbrado Público cuyas características específicas se indican en la Fig. 3.



Fig 3. Módulo de Alumbrado Público. URBO®

Es una plataforma segura de gestión de la iluminación que cuenta con la totalidad de las funcionalidades, para operar el sistema de control de las instalaciones de alumbrado público.

En este sistema, la aplicación permite a los administradores, usuarios, operadores y otros perfiles creados bajo políticas de administración, la gestión y actuación integral sobre las instalaciones del alumbrado público, conteniendo como principales funcionalidades, las que se describen a continuación: inventario y geolocalización, mantenimiento, planificación, supervisión de la eficiencia energética, entre

muchas otras que serán detalladas más adelante. Este sistema usa las tecnologías GPRS y la tecnología Wifi, que a través de software e inteligencia artificial (I.A.), permite realizar un monitoreo y control exhaustivo de la instalación de alumbrado público. Las aplicaciones web te aportan una panorámica global de los puntos de luz conectados, para que puedas acceder remotamente al encendido y apagado de la luminaria, su atenuación, la detección de fallos y otras funciones, permitiendo tener un gran ahorro de energía, lo que es una gran necesidad hoy en día.

Planifica y opera a través de una gestión digital, con la posibilidad de realizarla en tiempo real, las diferentes actividades asociadas al servicio de alumbrado público, mejorando la eficiencia al tomar decisiones apoyados en el análisis de los resultados de algoritmos I.A.

La plataforma URBO® incorpora la posibilidad de integrar un sistema de telegestión y la administración del mantenimiento y el control del alumbrado público, facilitando una política energética eficiente de la instalación y mejorando el servicio al ciudadano. La plataforma incorpora el apoyo en el uso, entre otras, de herramientas de Big Data y AI ('Artificial Intelligence') que permiten analizar datos útiles y relevantes, provenientes o no de la infraestructura de alumbrado, de modo que se puedan evaluar el desempeño de variables asociadas a la calidad de prestación del servicio

#### 4. Resultados

Sobre la base de la fundamentación teórica del estudio la Tabla 1, contiene una aproximación teórica conceptual sobre las sinergias entre las plataformas de gestión del alumbrado público que emplean las tecnologías inteligentes utilizando como estudio de caso las bondades ofrecidas por la plataforma URBO® y los objetivos de desarrollo sostenible contemplados en la agenda 2030 de las Naciones Unidas.

Tabla 1. Sistemas Gestión A.P 4.0 y ODS.

ODS	Aporte
	<p>Los sistemas de alumbrado público de las entidades municipales, representan una significativa fuente de consumo de energía, La explotación de instalaciones de alumbrado presenta características particulares que unidas a la descentralización geográfica del alumbrado público dentro de un mismo municipio dificultan una adecuada gestión. Por lo anteriormente expuesto existe un elevado potencial de ahorro energético en el diseño de las políticas de gestión de los sistemas de alumbrado.</p> <p>El empleo de componentes en los sistemas de alumbrado público, los cuales al final de su vida útil constituyan un residuo de bajo impacto ambiental o de alto impacto ambiental pero reciclables (cuando no haya otra alternativa mejor) serán los más indicados a utilizar</p>

	<p>Se aplicarían en las actuaciones las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para el levantamiento de la situación inicial así como el monitoreo y gestión continua de los sistemas. El objetivo principal sería dotar de mayor inteligencia al servicio de alumbrado y sobre todo interconectarlos entre sí con la finalidad de obtener un desarrollo sostenible.</p> <p>Plataforma inteligente de gestión del alumbrado Público. para operar el sistema de control de las instalaciones inventario y geolocalización, mantenimiento, planificación, super visión de la eficiencia energética, tecnologías GPRS tecnología Wifi, que a través de software e inteligencia artificial (I.A.), para monitoreo y control. Las aplicaciones web te aportan una panorámica global de los puntos de luz conectados, para que puedas acceder remotamente al encendido y apagado de la luminaria, su atenuación, la elección de fallos y otras funciones.</p> <p>Se obtendrían a través de la concepción de fórmulas mixtas de recursos propios o externos financiamientos de programas de inversiones para mejoramiento de los sistemas, base para la elaboración de un plan de actuación que involucra la acción conjunta de los organismos competentes para la ejecución de proyectos mayores sostenibles.</p>
	<p>La polución lumínica debido a una innecesaria emisión de flujo lumínoso hacia el cielo produce un derroche de energía con una consecuente emisión de CO2. Reducir el consumo en el alumbrado público optimizando las instalaciones reduce la emisión de CO2. Cuando la iluminación de espacios urbanos produce una dispersión de luz innecesaria hacia el cielo, ocurren una serie de efectos, algunos cuantificables y otros todavía inciertos.</p>
	<p>También el follaje de los árboles que crece continuamente bajo la iluminación, puede que sea mayor en tamaño, más susceptibles a la contaminación atmosférica y al estrés hídrico durante la temporada de cultivo, debido a que los poros estomáticos en las hojas permanecen abiertos durante períodos más largos. Hay una grande sensibilidad de los árboles leñosos a la luz artificial. Los árboles altamente sensibles deben evitarse en las zonas urbanas de alta iluminación donde se empleen lámparas con longitudes de onda ricos en rojo e infrarrojo.</p> <p>En el mismo reden de ideas el alumbrado urbano de luz blanca altera el hábitat y el comportamiento de los insectos. En climas subtropicales el efecto es muy notorio por la gran presencia de insectos. Por otra parte, produce molestias a las personas que permanecen o transitan cerca. Si además el cierre de las luminarias es pobre, se convierte en una trampa de insectos que obstruye la emisión de luz y reduce las condiciones de iluminación.</p>
	<p>Alianzas entre el sector privado, los gobiernos locales y la sociedad civil, cooperación en las áreas de finanzas, tecnología, comercio, políticas.</p>

## 5. Conclusiones

Desde el eje transversal de la sostenibilidad se pretende la reducción de las emisiones de CO2 acompañada de la transición energética al más bajo costo posible, equilibrando a su vez las potenciales amenazas en cuanto a la confiabilidad de las fuentes de energía, la seguridad climática, con la necesidad de recuperación económica mediante la rentabilidad sostenida. El desarrollo sostenible es la intersección de las dimensiones social, económica y medioambiental

La gestión de los sistemas de alumbrado público (SAP) de las entidades municipales o ciudades, representa una significativa fuente de consumo de energía, también de gran impacto desde el punto vista de sostenibilidad del medio ambiente, debido a los residuos generados por las propias instalaciones, la contribución en la reducción de emisiones de CO2, la contaminación lumínica e influencia en el crecimiento del hábitat de especies, la mejora del confort y salud pública de los ciudadanos.

Las instalaciones presentan características particulares que unidas a la descentralización geográfica dificulta una adecuada gestión, existe así un elevado potencial de oportunidades para la eficiencia energética-socio-mediambiental en el diseño de las políticas de gestión de los sistemas de alumbrado.

La gestión de los sistemas de alumbrado 4.0 es de vital importancia, permite soportar la toma de decisiones para la ejecución de un plan estratégico prospectivo, introduciendo como factor diferenciador e innovador la transformación digital mediante el uso de las tecnologías inteligentes exponenciales o disruptivas para satisfacer un nuevo perfil del ciudadano con conciencia de los ecosistemas del cual forma parte. Como resultado se encontraron las vinculaciones, contribuciones o aportes de la herramienta de gestión y explotación del módulo de alumbrado de la plataforma URBO® con los ODS 3,7,9,11, 13,15.

## 6. Referencias

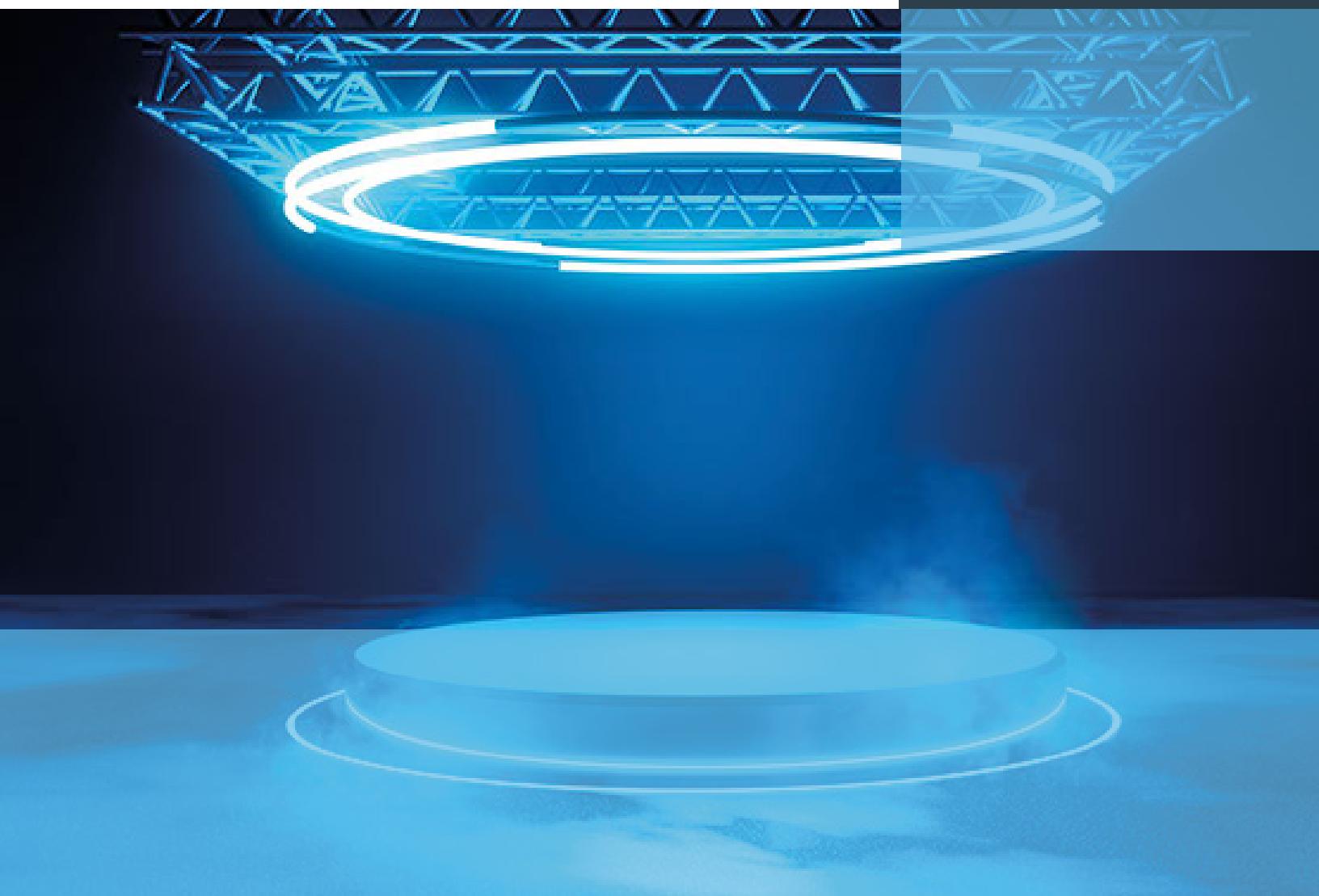
- [1] Assembly UNG. UN. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development; United Nations: New York, NY, USA, 2015.
- [2] United Nations. The sustainable development Goals Report. 7 Affordable Clean Energy; United Nations: New York, NY, USA, 2018.
- [3] IESNA, The Lighting Handbook: Reference and Application (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA/LIGHTING HANDBOOK). 2000
- [4] CIE, Publicación CIE 126:1997. Guía para minimizar la luminosidad del cielo.1997
- [5] COVENIN. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Alumbrado Público N° 3290. Alumbrado público Diseño. Caracas Venezuela.1997.
- [6] ISO 50001. (2011). Organización Internacional de Normalización. Norma Gestión de la energía.
- [7] Marimon, F.; Casadesús, M. (2017), Reasons to adopt ISO 50001 energy management system. Sustainability 9,
- [8] Jovanovic, B.; Filipovic, J. (2016). ISO 50001 standard-based energy management maturity model e proposal and validation in industry. J. Clean. Prod. 2016, 112, 2744–2755 1740.

- [9] Manzano E.R.. (2009) La iluminación de los espacios públicos urbanos, consideraciones sobre el entorno visual y el impacto ambiental. Parte II. Revista Luminotecnia N° 96, pág. 34 a 40. Editorial de la AADL Asociación Argentina de Luminotecnia.
- [10] CIE (2018). System for metrology of optical radiation for IPRGC-Influenced Response to light. CIE S 026/E:2018. DOI: 10.25039/S026.2018
- [11] IDEA. (2010) Protocolo de la Auditoría Energética de las Instalaciones de Alumbrado Público Exterior. España. 1era Edición.
- [12] Consultoría Lumínica. (2010) Manual Auditoría energética y medio ambiente del ecoalumbrado público del municipio. España. 1era Edición.
- [13] CIE (2018). System for metrology of optical radiation for IPRGC-Influenced Response to light. CIE S 026/E:2018. DOI: 10.25039/S026.2018

## 7. Biografías

Mailin Nava es el Gerente del Centro de Excelencia de Vepica en Caracas, Venezuela. Ing. Electricista, MsC en Gerencia de Proyectos, Doct. Ciencias Gerenciales, Especialista en gestión energética, estudios de postgrado en Gestión y Explotación del Alumbrado Público. Tiene más de 30 años de experiencia profesional en las áreas de ingeniería de consulta y asistencia técnica especializada en los sectores energético y petroquímico.

Juan Pocaterra es emprendedor en tecnologías para ciudades inteligentes Co-fundador y CEO de Vikua. Miembro del Consejo sobre el Futuro de Ciudades y del Consejo sobre el futuro del emprendimiento del Foro Económico Mundial. Miembro de la junta directiva de la fundación Global Shapers y Global Shaper Alumni del Hub de Caracas.



## **Sección 4.**

## **Luz, hábitat y calidad de vida.**

# Barreras que dificultan la adopción de planes estratégicos de iluminación en las ciudades argentinas

Silvina Rigali<sup>1a</sup>, Eduardo Manzano<sup>2b</sup>, María I. Castro<sup>3c</sup>, Rubén Corbalán<sup>4d</sup>, María V Saracco<sup>5e</sup>

<sup>1,3,4,5</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina

<sup>a</sup> [silvinarigali@yahoo.com.ar](mailto:silvinarigali@yahoo.com.ar), <sup>c</sup> [maricastro\\_7@hotmail.com](mailto:maricastro_7@hotmail.com), <sup>d</sup> [rocorbalan@yahoo.com.ar](mailto:rocorbalan@yahoo.com.ar), <sup>e</sup> [vicky.saracco@gmail.com](mailto:vicky.saracco@gmail.com)

<sup>2</sup> Depto. Luminotecnia Luz y Visión FACET Universidad Nacional de Tucumán. ILAV-UNT CONICET, Argentina

<sup>b</sup> [emanzano@herrera.unt.edu.ar](mailto:emanzano@herrera.unt.edu.ar)

**Resumen**—En este trabajo se plantea visibilizar algunas de las principales barreras que limitan la adopción de planes estratégicos de iluminación en ciudades con menos de 300.000 habitantes. La metodología de investigación se sustenta sobre encuestas en modalidad on-line, realizadas a funcionarios y técnicos de distintos municipios de la provincia de Santiago del Estero en las ciudades: Capital, La Banda, Termas de Río Hondo, Frías, Añatuya, Ojo de Agua, y Fernández, y meritando la opinión de especialistas que han transitado ese camino con éxito en otras ciudades de Argentina. Buscando avanzar más allá del diagnóstico, consideramos que las universidades debieran apropiarse y comprometerse en estas problemáticas, promoviendo activamente la adopción de Planes Estratégicos de Alumbrado Eficiente (un planteo consistente y a largo plazo, que quizás no refleje popularidad en lo inmediato). Desde esta perspectiva y motivados a iniciar esta discusión, desarrollamos un proyecto de investigación financiado por CICYT-UNSE, específicamente circunscripto a la Ciudad Capital de SDE.

**Palabras clave:** *Planes estratégicos, iluminación, barreras, municipios.*

**Abstract**-This paper aims at making visible some of the main barriers constraining the adoption of Strategic Lighting Planning in towns with population less than 300,000 inhabitants. The research methodology is based upon on-line surveys made to officials and technicians from different municipalities such as: Capital, La Banda, Termas de Rio Hondo, Frias, Añatuya, Ojo de Agua y Fernandez regarding the specialists' opinions that have previously paved this way successfully. In search of going beyond the diagnosis, we think that universities should appropriate and commit themselves in these issues, promoting the adoption of Strategic Public Lighting efficiently (a consistent and long-term plan that might not meet popular demands in the short-run). That's why form this perspective, we develop a research project funded by CICYT- UNSE and specifically circumscribed to Capital, the largest municipality of Santiago del Estero.

**Key Word:**  
*Strategic Public, Lighting, barriers, towns.*

## 1. Introducción

Un Plan Estratégico es una herramienta de planificación integral (para el alumbrado público de una ciudad en este caso) que permite tener un diagnóstico preciso de la situación, y a partir del mismo, entre todos los actores públicos y privados consensuar propuestas para el logro de objetivos comunes para avanzar en una forma moderna, participativa y democrática en la tarea de pensar y organizar el desarrollo. El Plan Estratégico se define a sí mismo como una política de Estado que trasciende la visión de un gobierno, con la intención de expresar denominadores comunes con la sociedad civil [1].

Este documento va a presentar un estudio comparativo, sobre las barreras que dificultan la adopción de Planes Estratégicos de Iluminación de Ciudades en la República Argentina (RA).

En un contexto más amplio, y reconociendo que los planes estratégicos de planeamiento y desarrollo de una ciudad tienen más de 100 años en la Argentina, el caso icónico es el de la Ciudad de la Plata cuya creación en 1882 fue planificada, y hasta el día de hoy sostiene un Plan Estratégico (2.030) [2], o el Plan Director de Le Corbusier en Buenos Aires (1.938),[3] mundialmente reconocido, en base a estos antecedentes, y a otras relevantes iniciativas como el Movimiento de Eurociudades, las 50 ciudades más importantes de Europa trabajando en Planificación Estratégica, Sostenibilidad, y ahora en favor de un cambio de enfoque en la manera de iluminar las ciudades y de gestionar las redes de alumbrado público: Iluminación calmada y puesta en valor del trabajo bien hecho como argumento diferencial. Una petición que empieza a coger fuerza en la ciudadanía. El “Manifiesto Slowlight” [4] es contundente.

Por lo expresado reconocemos que su aplicación se torna imprescindible para asegurar un crecimiento organizado, sostenible, y para aprovechar los recursos públicos, los gobiernos de las ciudades son quienes administran éstos, y la

falta de planificación a mediano y largo plazo opera en contrario de sus propias políticas, y el desconocimiento y apatía de la población facilita esta práctica deficiente.

¿Cuáles son los objetivos esperados del programa en el corto, mediano y largo plazo? ¿Cuáles son las conexiones causales entre las actividades del programa, las barreras y el comportamiento de las partes interesadas y los usuarios finales? ¿Cómo se lograrán dichos objetivos a través de las actividades del programa?

¿Qué pasa con la Iluminación Pública? Inmersos en una revolución tecnológica, instalando luminarias eficientes, con una durabilidad de varios años, (según los fabricantes 50.000 a 100.000 horas, entre 12 y 24 años para el alumbrado público), nos encontramos en una oportunidad única para planificar, cuales son las prioridades y diseñar cada circuito, cada sector en un *programa integral* que contemple: *Eficiencia, calidad, seguridad, alternativas para transformar* esos sectores en Smart City [5], o al menos operar los sistemas con posibilidades de contar con dos niveles de iluminación en arterias principales tipo C, cuando el tráfico disminuye a altas horas de la noche, esto podría traducirse en ahorros significativos de energía eléctrica.

Pero se hace todo lo contrario, se deciden las obras públicas según la decisión de una o varias personas del gabinete de gobierno, se establecen prioridades en las que los vecinos no han participado, ni a través de sus concejales (los representantes naturales), y esto se evidencia desde el presidencialismo fuerte, que se replica en los gobiernos provinciales y municipales. ¿Cómo podemos participar los especialistas, los vecinos, las ONGs, si somos informados de la obra cuando leemos la licitación pública en el periódico?

En medio de esta crisis que se profundizará en el período pos-pandemia, utilizar los recursos del estado con responsabilidad, es imperativo. Los especialistas no podemos permanecer en la zona de confort de la crítica, a quienes pertenecemos a los Institutos de Investigación, y a las Universidades Públicas, nos cabe el pensamiento de ruptura con los parámetros establecidos, nos toca hacernos cargo de la utopía de trabajar para que los gobiernos locales transformen su visión, de-construyan sus metodologías lo que representa proyección, esperanza y resistencia.

El momento es ahora, la tecnología disponible hace que sea el momento idóneo. El inmovilismo hará de nuestra ciudad una ciudad retrasada en términos de conectividad, y la conectividad llama al negocio y a la prosperidad económica, las empresas y la industria, siempre elegirán ciudades conectadas. Hoy en día, gracias a la tecnología que poseemos, nos debemos sentir en la obligación de hacer de nuestras ciudades mejores lugares para vivir.

Para poder asumir este protagonismo, y que no quede como uno de tantos “convenios marco” firmado entre instituciones, es necesario estudiar el campo donde suceden los hechos, por eso comenzamos con esta propuesta de investigar que piensan los políticos y los funcionarios y técnicos de algunos municipios.

Asimismo, y como se verá más adelante, se debe comparar la importancia de cada una de las barreras mediante la recolección de datos a través de instrumentos como entrevistas, grupos seleccionados o focales y encuesta.

Las barreras se pueden categorizar en cinco clases: institucionales/culturales (no existen políticas públicas nacionales); financieras; técnicas (falta de recursos humanos preparados); de información (no lo consideran urgente). Esta categorización facilita la labor del analista en la medida en que presenta las barreras en forma concisa y le permite establecer comparaciones.

## 2. Metodología y Desarrollo

En esta excepcionalidad que ha significado la pandemia de Covid-19, con el consecuente aislamiento de la sociedad, se ha debido recurrir a nuevas estrategias para recolectar información, debido a esto la Encuesta sobre Barreras para la adopción de Planes Directores de Alumbrado Público en Ciudades, fue creada a partir de los formularios de Google, y compartida a través de correo electrónico, y mediante enlaces con las páginas oficiales de los Municipios, y la Red Social Facebook, y debemos inferir que para algunos técnicos y funcionarios este tema no es relevante, o tal vez las mismas circunstancias de estar desbordados por los contagios que se multiplican día a día, no tuvieron oportunidad de responder. En las Fig. 1, 2, 3 y 4, se puede apreciar el formato y las preguntas de la encuesta.

**Encuesta sobre Barreras para la adopción de Planes Directores de Alumbrado Público en Ciudades**

Desde un Proyecto de investigación de Eficiencia en Alumbrado Público de la FODyT UNB, estamos buscando respuestas entre los actores del sistema para contribuir mejor al desarrollo sostenible del ATPI.

\*Obligatorio

1. Cargo que ocupa en la Institución \*
2. Correo electrónico \*
3. Número de teléfono \*
4. Número de Habitantes del Municipio \*
5. Número de Luminarias totales

Fig.1. Encuesta: datos generales

6. Porcentaje de Luminarias LED's del total del parque lumínico

Marca solo un ítem.

- Más del 50%
- Entre 20 y 49%
- Menos de 20%
- No posee luminarias LED

7. El encendido de los circuitos es:

Marca solo un ítem.

- Celula Fotovoltaica
- Reloj Astronómico
- Automatizado (Smart City u otra)

8. Se han realizado registros de los niveles de iluminancia?

Marca solo un ítem.

- Sí
- No
- No sabe

Fig.2. Encuesta: información y características del parque lumínico

13. ¿Cuáles son a su criterio los mayores problemas que impiden o favorecen la adopción de Planes directores de Iluminación?, teniendo en cuenta los buenos resultados de ciudades como (B. As, Rosario y Córdoba)?

Marca solo un ítem.

- Falta de capacitación de los recursos humanos
- Falta de recursos financieros, para encarar la problemática en su conjunto
- Considera importante pero no urgente buscar la eficiencia energética, y el mejor aprovechamiento de los recursos
- La no existencia de políticas públicas nacionales que favorezcan o premien estas acciones

Iniciar pagina con barra de navegación

31/10/2020 Encuesta sobre Barreras para la adopción de Planes Directores de Iluminación Pública en Ciudades

14. Desearía recibir capacitación (gratuita) para su personal, desde los profesionales de la UNSE

Marca solo un ítem.

- Sí
- No
- Tal vez

Fig.4. Encuesta: barreras para la adopción de Planes Estratégicos y opciones de recibir capacitación

10. ¿El Municipio cuenta con personal calificado para digitalizar el parque de Luminarias?

Marca solo un ítem.

- Sí
- No

11. ¿La ciudad cuenta con Un Plan Director o Plan (Estratégico de Iluminación)?

Marca solo un ítem.

- Sí
- No

12. Si la respuesta anterior era positiva, ¿En qué base de desarrollo se encuentra?

Marca solo un ítem.

- Reuniendo y digitalizando toda la información
- Capacitando y formando los equipos técnicos
- Compartiendo y difundiendo el Plan con el HCD y las asociaciones vecinales
- Elevarlo el Documento para los proyectos y planes de explotación y mantenimiento programados en los próximos 5 años

Fig.3. Información específica sobre Planes Directores de Iluminación

Se procesaron las respuestas recibidas, un 41% de las enviadas, y se muestran los resultados mediante gráficos de barra de Excel, de modo de enfatizar/ visualizar en que barreras se debe trabajar para debilitarlas, y superarlas.

#### A. Resultados

Los resultados más allá de algún desacuerdo en los sujetos encuestados, en cuestiones relativas al mismo municipio, por ejemplo en lo referente a número de habitantes, el número de habitantes de cada población debe actualizarse, ya que han pasado 10 años del último (décimo) Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas de la República, y casi todo los entrevistados coincide en reconocer ese número de habitantes. En la Fig.5 se observa la diferente densidad poblacional de cada ciudad analizada.



Fig. 5. Resultado de la Encuesta, cantidad de habitantes

Otra divergencia apareció en cuanto al porcentaje de luminarias LEDs instaladas, con respecto al parque total, ya que hubo para el mismo municipio diferencias en 15%, y este dato es relevante y asumimos debido a la falta de un Sistema

de Información (banco de datos) de cada luminaria, tipo, año de instalación, tan necesario como punto de partida para un plan integral de modernización y eficiencia. En la Fig. 6, referimos a esto al utilizar el término “aproximado”.

En la Fig.7 observamos el resultado descripto como Factor de ponderación en porcentaje, sobre las principales barreras a la adopción de Planes desde la óptica de técnicos, profesionales, y funcionarios de las áreas municipales. El principal obstáculo para ellos es la falta de recursos financieros, seguido por la baja formación de recursos humanos especializados, y por la ausencia de Planes y/o políticas de incentivo y casi sin incidencia se encuentra el ítem respectivo a no considerarlo necesario.

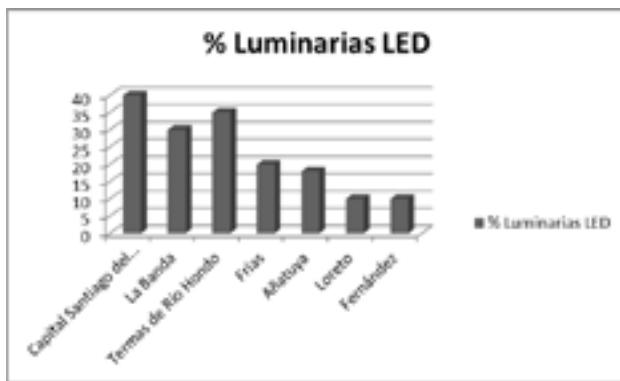


Fig. 6. Porcentaje aproximado de Luminarias LED sobre el parque total



Fig. 7. Factor de ponderación en porcentaje sobre las principales barreras a la adopción de Planes reconocidas

## B. Análisis de Resultados

Según manifestaciones de técnicos de la Municipalidad de la Capital, con quienes pudimos discutir con algo de profundidad el tema, la principal barrera económica percibida tiene relación con los mayores costos de inversión inicial

debido a la incorporación de tecnologías (automatización), y programas de organización de la información existente. Esta barrera podría ser superada en el mediano plazo si se demuestra los beneficios de un Plan Estratégico en la explotación de las instalaciones.

Asimismo, la barrera de escasa capacitación especializada de recursos humanos está transversalmente sesgada por la barrera económica, debido a que contratar especialistas genera mayores costos de honorarios. Los entrevistados perciben que es necesario que los equipos de diseño integren a especialistas en temas de Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente. Aquí que cada Municipio promueva la formación de sus recursos humanos es esencial. Así como el apoyo que desde las universidades, e institutos especializados en la temática puede ofrecerse en este aspecto.

Tabla 1. Barreras detectadas

Tipo de barrera	Se corresponde a
Económica	Una mentalidad cortoplacista del medio, que contrasta con las características intrínsecas de estas estrategias que tienen beneficios a mediano y largo plazo [6]
Falta de capacitación de los Recursos Humanos	La necesidad de capacitar los recursos humanos de la administración pública, un Plan estratégico de iluminación administra los recursos, organiza las obras futuras, y promueve la conciencia ambiental a través del trabajo profesional. Y pondrá la Ética ambiental con respecto al calentamiento global.[7]
Ausencia de Políticas Públicas que incentiven	El Estado Nacional podría premiar las consecuencias que derivan de la adopción de Planes Estratégicos Iluminación, por ejemplo Eficiencia Energética, crecimiento Sostenible, reducción de Tn de CO2. Y además financiar la capacitación de recursos humanos mediante programas.[8]

## 3. Conclusiones

La detección de estas barreras tiene interesantes implicancias para la generación de políticas públicas, para la educación y para la investigación.

El Diseño de Planes Estratégicos de Iluminación está dirigido a funcionarios, técnicos y profesionales de gobiernos locales que deseen mejorar y/o transformar sus prácticas [9]. Pero debiera ser materia de debate en las legislaturas municipales (Concejos Deliberantes) ya que quienes afrontan los gastos de la administración finalmente son los vecinos de la ciudad mediante sus impuestos, y consideramos muy importante la necesidad de divulgar esta información entre el medio profesional y el público general (asociaciones de vecinos, ONGs), ya que existe la percepción de que los resultados de investigación (en Planes Estratégicos de Iluminación, o Eficiencia Energética) no llegan a todas las personas interesadas. Esto implica que no solo es importante

la publicación en revistas científicas, sino también en medios de alcance masivo.

Los Planes Estratégicos de Iluminación se cimentan sobre la eficiencia energética, y con ello traen ahorros de energía, sostenibles y adicionales, reducción de la demanda y/o reducción de las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) con beneficios derivados como la mitigación del cambio climático, ahorro en costos de capacidad evitados, aumento de la seguridad energética, reducción de costos de energía.

Derribar estas barreras, implica un desafío para los Municipios, y simultáneamente expone una deuda para las instituciones de educación, que tienen el rol de reconvertir conocimientos y habilidades a los profesionales y técnicos.

Temas de eficiencia energética y sostenibilidad deben integrarse a los planes de estudio de las carreras de Ingeniería en Eléctrica, Electromecánica, Civil, e Industrial y a las tecnicaturas de nivel medio que preparan técnicos.

#### 4. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden el que fueron referidas.

- [1] F. Deco, Tesis de Magíster “Gestión de la información para la evaluación del mantenimiento del alumbrado público”(2.009) ISBN-10: 3846573590 ISBN-13: 978-3846573594.
- [2] Plan estratégico Proyecto La Plata 2010, Diagnóstico Participativo, Lineamientos Estratégicos. Recuperado el 12 de Julio de 2020 de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anteproyecto\\_del\\_plan\\_estrategico\\_de\\_desarrollo\\_urbarano\\_baradero.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anteproyecto_del_plan_estrategico_de_desarrollo_urbarano_baradero.pdf)
- [3] Plan estratégico de Buenos Aires, “La Ciudad pensada”, Recuperada de 10/07/20: [http://www.ssplan.buenosaires.gov.ar/MODELO%20TERRITORIAL/3.%20Ciudad%20Pensada/3\\_ciudad\\_pensada.pdf](http://www.ssplan.buenosaires.gov.ar/MODELO%20TERRITORIAL/3.%20Ciudad%20Pensada/3_ciudad_pensada.pdf)
- [4] Alcazar C., Valiño R. Manifiesto Slowlight <https://diadelaluz.es/files/Iniciativa-slowlight.pdf> consultada el 8/9/2020
- [5] SML Smartlighting Magazine, N° 06 Mayo 2020, smart-lighting.es Recuperado 05/06/20 de: <https://magazine.smart-lighting.es/wp-content/uploads/2018/11/Smlmag6-Conectividad-DEF-LOW.pdf>
- [6] M. Trebilcock, “Percepción de barreras a la incorporación de criterios de eficiencia energética en las edificaciones,” 2010
- [7] C. A. Barenboim Estructuración, crecimiento y transformación urbana en la ciudad de Rosario 2.011. Recuperado 15 de agosto de 2020 de: [https://uai.edu.ar/media/42579/ganadores\\_estructuraci%C3%B3n-crecimiento-y-transformaci%C3%B3n-urbana-en-la-ciudad-de-rosario.pdf](https://uai.edu.ar/media/42579/ganadores_estructuraci%C3%B3n-crecimiento-y-transformaci%C3%B3n-urbana-en-la-ciudad-de-rosario.pdf)
- [8] V. Dufresne, P. Langlois, M. Couture-Roy y S. Flamand, “Guía Diseño de Programas de Eficiencia Energética” Econoler Incorporated, Canadá, BID, 2013.
- [9] Anteproyecto de Desarrollo del Plan Estratégico de Desarrollo Urbano de Baradero, Municipalidad de Baradero. Recuperado de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anteproyecto\\_del\\_plan\\_estrategico\\_de\\_desarrollo\\_urbarano\\_baradero.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anteproyecto_del_plan_estrategico_de_desarrollo_urbarano_baradero.pdf)

#### 5. Biografías

**Mag. Ing. Silvina Luján Rigali:** se desempeña como docente exclusivo de grado y posgrado e investigadora en la FCEyT - Universidad Nacional de Santiago del Estero, se ha graduado como ingeniera electromecánica (UNSE), especialista en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente en la UNT.(2006), Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad en la UNIA, España (2011), y Magíster en Luminotecnia en la UNT (2017), trabaja en proyectos de investigación en la temática, obtuvo tres becas

internacionales Universidad internacional de Andalucía 2.009, Universidad Politécnica de Madrid (2012) y Universidad Tecnológica de Tulancingo en México, invitada como Profesora visitante (2015), y ha trabajado en el Municipio de Santiago del Estero en las áreas de Alumbrado Público y Planeamiento Urbano durante 18 años. Ha sido Experto Evaluador de OAA, en Laboratorios de Ensayos de Luminarias.

**Dr. Ing. Eduardo Manzano** actualmente se desempeña como Secretario de Ciencia y Técnica de la FACET, es investigador, cuenta con numerosas publicaciones en revista nacionales, e internacionales, autor y editor de libros en la temática de Luminotecnia y Eficiencia Energética, es director de Proyectos de Investigación, es Ingeniero Electricista Orientación Industrial (UNT) graduado en 1987, obtuvo el Título: Magíster en Ingeniería orientación Luminotecnia (UNT) en 1995, es Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPCE), desde el 2001. Docente de grado y posgrado en el Departamento de Luminotecnia Luz y Visión, Profesor Titular por Concurso. Ha dictado conferencias y charlas de divulgación en Congresos y Jornadas Técnicas en el país y el resto del mundo, y ha dirigido a muchos estudiantes de posgrado en el desarrollo de sus tesis de Magíster y Doctorado.

**Mag. Arq. María Isabel Castro Saavedra** actualmente es profesora Asociada e investigadora en la FCEyT - Universidad Nacional de Santiago del Estero, se ha graduado como Master en tecnologías avanzadas de construcción arquitectónica en la Universidad Politécnica de Madrid, España, (1996), ha cursado el Programa Master en Conservación de patrimonio, Bs As, (2008-2009), y el Magíster en Historia de la Arquitectura y el Urbanismo Latinoamericanos, en el Instituto de Historia de la UNT,(I.999.2001) ha aprobado la totalidad de los cursos. Es Coordinadora del Proyecto PFIP proyectos federales de innovación productiva para “creación de Circuitos Eco turísticos Sustentables en cercanías de Villa La Punta mediante la reutilización del Patrimonio Ferroviario en Desuso- Dpto. Choya Santiago del Estero” desde Julio de 2009 y continua a la fecha. Ha realizado numerosas publicaciones.

**Ing. Ruben Corbalán:** es Profesor Asociado semi-exclusivo de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la FCEyT UNSE, en las asignaturas Sistemas de Potencia, y Mercado Eléctrico, ha realizado muchos cursos de especialización en el marco del Doctorado en Sistemas de Potencia UNSJ, además es Director del Departamento de Electricidad de la Secretaría de Planeamiento Físico de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.

**Srta. María Victoria Saracco,** es estudiante del 5º y último año de la carrera de Ingeniería Industrial, en la FCEyT UNSE, Becaria del Proyecto CICyT UNSE de investigación *Eficiencia Energética en Alumbrado Público: Evaluación, Diagnóstico y propuesta para la Ciudad de Santiago del Estero*, Cod. 23C/159 (2019-2021). Ha realizado la Capacitación de 60hs en Gestores Tecnológicos en Eficiencia Energética en FCEyT UNSE(2019).

# Diseño y validación de un sistema germicida con lámpara UVC de baja presión monocromática (254 nm)

Angélica Vargas Chavarro <sup>1,a</sup>, Leonardo E. Bermeo<sup>1,b</sup>, Francisco J. Amórtegui.<sup>1,c</sup>, Jesús M. Quintero <sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia,

<sup>a</sup> [anvargasch@unal.edu.co](mailto:anvargasch@unal.edu.co), <sup>b</sup> [lbermeo@unal.edu.co](mailto:lbermeo@unal.edu.co), <sup>c</sup> [fiamortegui@unal.edu.co](mailto:fiamortegui@unal.edu.co), <sup>d</sup> [jmquinteroqu@unal.edu.co](mailto:jmquinteroqu@unal.edu.co).

**Resumen**— La implementación de sistemas germicidas con el uso de fuentes fluorescentes de baja presión UVC, las cuales presentan aproximadamente el 90% de radiación cerca de los 254 nm, se presentan como una de las principales alternativas de desinfección en superficies lisas donde la radiación de la lámpara puede cubrir en su totalidad el área a desinfectar. El objetivo de este trabajo fue realizar el diseño de irradiancia UVC, con el uso de un software estándar de diseño de iluminación, el cual se ajustó para que los valores normalmente entregados de iluminancia (luxes), correspondieran a los de irradiancia ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), y posteriormente se validaron estos resultados al implementar el sistema de desinfección UVC y hacer mediciones con un sensor fotodiodo en el rango UV y de esta forma poder contrastar los valores de irradiancia obtenidos por el software y los medidos con el sensor calibrado.

**Palabras clave.** Diseño UVC, germicidas, irradiancia, simulación.

**Abstract.** - The implementation of germicidal systems with the use of low-pressure UVC fluorescent sources, which present nearly 90% of radiation near 254 nm, are presented as one of the main disinfection alternatives on smooth surfaces where lamp radiation can completely cover the area to be disinfected. The objective of this work was to carry out the UVC irradiance design, with the use of standard lighting design software, which was adjusted so that the normally delivered illuminance values (luxes) correspond to the irradiance ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), and later these results were validated by implementing the UVC disinfection system and making measurements with a photodiode sensor in the UV range and thus being able to contrast the irradiance values obtained by the software and those measured with the calibrated sensor.

**Key Words.** UVC design, germicidal, irradiance, simulation.

## 1. Introducción

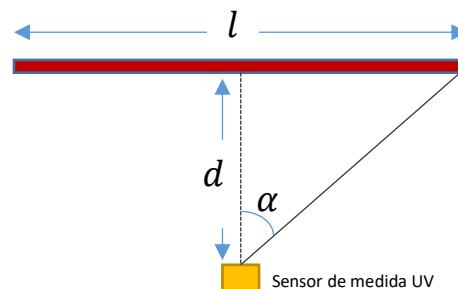
La desinfección con el uso de fuentes fluorescentes de baja presión UVC es usual en laboratorios donde se manipulan agentes patógenos y hay grandes áreas para desinfectar. También es usual para la desinfección de la parte alta de las salas de cuidados intensivos o habitaciones donde los pacientes tratados generan aerosoles con contenidos de patógenos de alto riesgo de contagio. Teniendo en cuenta que este tipo de radiación puede afectar severamente los tejidos humanos, ya que puede provocar desde quemaduras leves en la piel, hasta ceguera permanente dependiendo del nivel de exposición o la dosis recibida. Por esta razón es importante implementar medidas de seguridad para que no haya posibilidad que una persona pueda verse expuesta a esta radiación en forma accidental.

## 2. Calibración del sensor de medición de UVC

Para el sistema germicida propuesto con lámpara UVC, se utilizaron los tubos fluorescentes lineales germicidas G55T8/OF de la marca Osram, potencia de 55W, longitud de la fuente de radiación 0.84 m.

La calibración del sensor de UVC se realizó mediante el método de la medición de emisión de flujo en lámparas UV monocromáticas (254 nm) de baja presión [1]. Las pruebas se realizaron en un cuarto oscuro, con temperatura controlada y una fuente de energía estable. Para el montaje de la prueba, el sensor de medición de UV se ubica perpendicular al centro de la lámpara, a una distancia ( $d$ ) de 3 y 4 metros, como se presenta en la figura 1.

Fig. 1. Esquema del montaje de medición, adaptación Figura [1].



Basados en la fórmula de Keitz (1971), que dice:

$$P = \frac{E2\pi dl}{2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (1)$$

Donde:

$E$  en la irradiancia medida ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$d$  Distancia del centro del tubo al sensor

$l$  Longitud de radiación del tubo

$\alpha$  Angulo medio en radianes entre el sensor y el tubo.

Tal que,  $\tan \alpha = L/(2D)$

Para minimizar los efectos de reflexión en las mediciones se implementó el método de medición con una pantalla que cubre el 110% de la longitud de la lámpara, ubicado entre la fuente y el sensor, como se presenta en la figura 2 y 3. El método consiste en realizar las mediciones con el detector de UV a una distancia de 3 a 6 metros, repetir la medición con una pantalla ubicada a un metro de la lámpara frente al sensor UV, este último valor obtenido representa la irradiancia por reflexión de la sala y se resta de la medición tomada sin pantalla, se repite el proceso por cada valor  $d$  evaluado.

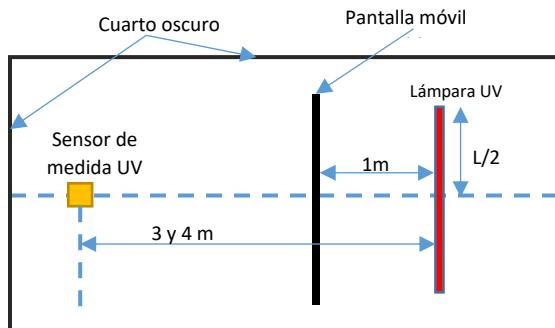


Fig. 2. Esquema del montaje de medición de las pruebas de calibración con pantalla ubicada a 1 metro de la fuente de UVC.



Fig. 3. Imagen del montaje de medición de las pruebas de calibración con pantalla móvil.

Con las mediciones realizadas se validó la calibración del sensor de UVC utilizado, reportando un error de 0.2% entre las mediciones con la variación de la distancia.

Teniendo en cuenta la potencia eléctrica consumida por el tubo UVC, la eficiencia de éste y la ecuación de Keitz, se calcula el valor de la irradiancia a tres metros de distancia:

$$E = 0.9 \text{ W/m}^2 = 90 \text{ uW/cm}^2$$

Este valor se tomó como referencia de ajuste del diseño a simular en el software de iluminación. Así mismo, se realizó la fotometría de un tubo fluorescente con el mismo reflector a usado en el diseño de UVC con la disposición del sistema a ser instalado, como se puede ver en la figura 4.

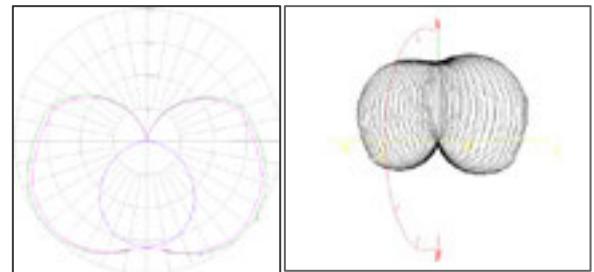


Fig. 4. Diagrama polar, de la distribución de intensidades luminosas de la luminaria fluorescente T8 utilizada en el diseño.

### 3. Diseño del sistema con el software DIALux evo

Para determinar el valor de ajuste del flujo luminoso ( $\Phi$ ) del tubo a utilizar en el programa de diseño, se creó un local con reflectancia de superficie 0, se ubicó un punto de cálculo perpendicularmente a la fuente a 3 metros de distancia y se determinó el valor de  $\Phi$ , para que  $E = 90lx$ . De esta forma, se tiene el resultado del diseño de iluminancia en los valores equivalentes de irradiancia en  $uW/cm^2$ .

El laboratorio objeto de diseño, cuenta con 3 espacios, los cuales incluyen mesones de trabajo, equipos técnicos, mobiliario propio laboratorio, la simulación se realizó procurando disponer de los elementos tal como se tienen en físico, ajustando los valores de reflectancia de paredes y mobiliario, según el listado de reflectancia [2] en los rangos UVC/UVB que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Reflectividades de material ultravioleta (rango UVC/UVB).  
Fragmento del apéndice F de [2]

Material	$\rho (%)$
Concreto	19 (max).
Esmalte de porcelana blanca	4.7
Pintura de agua (10-30)	20
Vidrio	4

En el diseño se posicionaron malla de cálculo a nivel de piso y sobre mesas de trabajo, cada malla con una disposición de puntos cada 10 cm. El laboratorio cuenta con 5 espacios definidos y se presentan en figura 5.

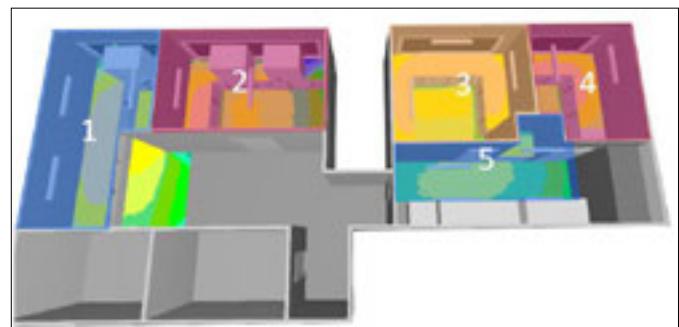


Fig. 5. Diagrama de las salas de trabajo que se tienen en el laboratorio de microbiología.

Los valores de irradiancia mínima obtenidos en las mesas de trabajo fueron de  $181 \text{ uW/cm}^2$ , cada espacio se presenta en la tabla 2:

Tabla 2. Resumen de resultados de Irradiancia mínima en el rango de 254 nm en cada una de las zonas de diseño.

Espacio	Mesas de trabajo $E_{min} (\text{uW/cm}^2)$	Piso $E_{min} (\text{uW/cm}^2)$
Sala 1	198	48
Sala 2	247	76
Sala 3	208	52
Sala 4	181	48
Zona 5	N/A	80

#### 4. Modelo de tiempo de desactivación del virus.

Para la desactivación de virus y bacterias, las superficies deben ser expuestas por un tiempo a la radiación UVC, en función a los niveles de irradiancia, de acuerdo a [2]:

$$D = T_E \cdot E \quad (2)$$

Donde:

$D$  Dosis de exposición UV en  $\text{J/m}^2$

$T_E$  Tiempo de exposición en segundos

$E_R$  Irradiancia en  $\text{W/m}^2$

Cuando la dosis de UV da como resultado una tasa de inactivación del virus o bacteria del 90% (supervivencia del 10%), se conoce como  $D_{90}$ . El valor  $D_{90}$  se usa comúnmente como un indicador del tamaño del sistema y puede usarse para evaluar la tasa de supervivencia de virus o microbios individuales. También es común el  $D_{99}$ , o la dosis que resulta en una inactivación del 99% [2].

Se acuerda a [2] La ecuación de inactivación en una sola etapa para los virus o bacterias expuestos a la irradiación UV es:

$$S = e^{-kD} \quad (3)$$

Donde:

$S$  Fracción de supervivencia

$k$  Tasa constante de UV en  $\text{m}^2/\text{J}$

De acuerdo con el tipo de virus y tasa de desinfección el valor de la constante  $k$  varía, tal como se presenta en la tabla 3. Para este caso se calculó el tiempo de exposición para Coronavirus tipo ssRNA.

Tabla 3. Tasa de UV para Coronavirus. Fragmento del apéndice B de [2].

Microbio	$D_{90}$ $\text{J/m}^2$	$k$ UVGI $\text{m}^2/\text{J}$	Medio	Fuente
Coronavirus	3	0.377	Aire	Walker 2007
Coronavirus	7	0.321	Agua	Weiss 1986
Coronavirus (SARS)	229	0.01	Aqua	Karim 2004
Coronavirus (SARS)	3046	0.00076	Aqua	Darnell 2004

Como se presenta en las fig.6 y Fig.7, el menor nivel de irradiancia UV para las mesas de trabajo del laboratorio se encuentra en  $1.81 \text{ W/m}^2$ , por tanto, el tiempo de exposición del virus para un  $D_{99}$ , es de 6.4 minutos. En el caso del nivel de piso donde se tiene una irradiancia mínima de  $0.48 \text{ W/m}^2$ , se requiere una exposición de 24 minutos.

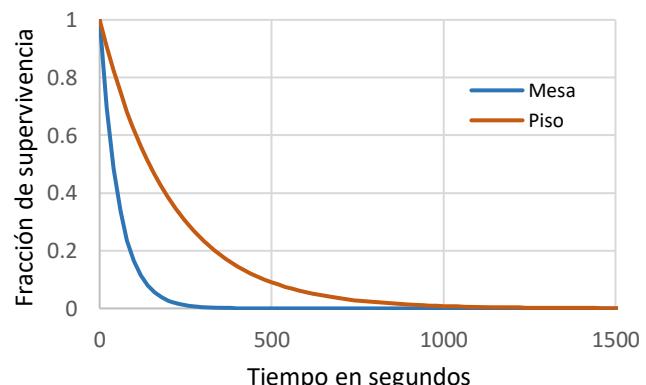


Fig. 6. Curva UV de supervivencia del Coronavirus SARS expuesto a una  $E_R = 1.81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  y  $E_R = 0.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

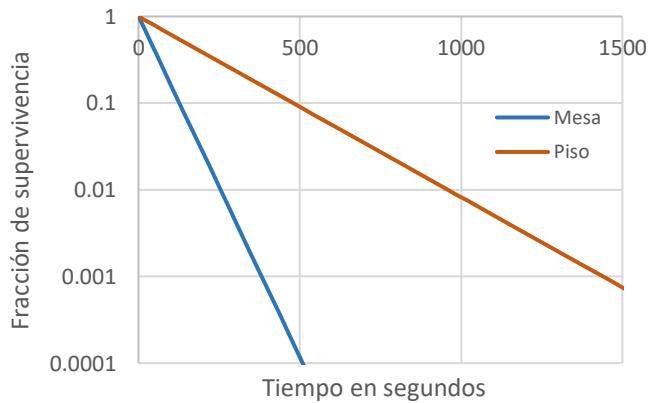


Fig. 6. Fracción de supervivencia del Coronavirus SARS expuesto a una  $E_R = 1.81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  y  $E_R = 0.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

#### 4. Conclusiones

El uso del software de diseño de iluminación DIALux evo, para simular los niveles de irradiancia UVC en instalaciones que implementen esta técnica de desinfección, representa una alternativa efectiva para conocer la irradiancia en cada una de las zonas y de esta forma determinar los tiempos adecuados de exposición para aplicar la dosis que inactive el virus.

La implementación de sistemas de desinfección UVC, se recomienda integrar con equipos de control, que minimicen la activación de las fuentes en la presencia de personas, tales como con sensores de ocupación.

Dado los actuales horarios de trabajo en el laboratorio de microbiología, la implementación de sistemas de desinfección UVC, con tiempos de exposición de 24 minutos, representa una optimización del tiempo y reducción de riesgos en las labores diarias que se realizan en las salas de trabajo del laboratorio.

La metodología de validación del sensor de medida UVC, presento una alta precisión en el equipo construido, permitiendo realizar mediciones de validación en situ.

#### 5. Referencias

- [1] O. Lewal, B. Dussert, C. Howart, K. Platzer, M. Sasges, J. Muller, E. Whitby, R. Stowe, V. Adam, D. Witham, S. Engel, P. Posy, A. Pol. "Method for the Measurement of the output of Monochromatic (254nm) Low-Pressure UV Lamps". Spring. 2017.
- [2] W. Kowalski. "Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook". Spring. 2009.

#### 6. Biografías

Angélica Vargas Chavarro. Estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera de Sistemas de la Universidad de Cundinamarca, Especialista en Iluminación y Magíster en Automatización de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en Control, Diseño de Iluminación y en Planeación de Sistemas de Alumbrado Público.

Leonardo E. Bermeo PhD. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magíster en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Río de Janeiro. Experto en Sistemas de Automatización y Control para sistemas digitales y analógicos, así como en Tratamiento de Señales.

Francisco J. Amórtegui. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Planeación Educativa. Experto en Campos Electromagnéticos, Sistemas de Alta Tensión, Metrología Eléctrica, Iluminación y en Sistemas de Electrónica de Potencia. Experto variables fotométricas y radiométricas.

Jesús M. Quintero PhD. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electricista y Especialista en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Telemática de la Universidad de los Andes, Doctor en Ingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya. Experto en el área de Iluminación, Energías Renovables y en sistemas de Electrónica de Potencia. De igual manera, es experto en la caracterización de variables cuantitativas y cualitativas asociadas al funcionamiento de sistemas ópticos y de iluminación.

# Proposta para redução da poluição luminosa nas orlas capixabas

Juliana Ferreira Nunes<sup>1,a</sup>, Ricardo Nacari Maioli<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>FAESA - Faculdades Integradas São Pedro

<sup>a</sup> [juliana.nunes97@hotmail.com](mailto:juliana.nunes97@hotmail.com)

<sup>b</sup> [ricardo.nacari@faesa.br](mailto:ricardo.nacari@faesa.br)

**Resumo** — O trabalho objetiva elaborar uma proposta para o sistema de iluminação pública de três orlas da região da Grande Vitória, localizados no estado do Espírito Santo, Brasil, com o intuito de reduzir a Poluição Luminosa seguindo as orientações da literatura e da norma vigente sobre iluminação pública no país. A pesquisa foi dividida em duas partes, sendo a primeira fase a análise das características gerais e recolhimento de dados dos locais estudados e, na segunda, a apresentação da proposta de projeto, com o auxílio do software DIALux. O projeto foi desenvolvido com escolha adequada do sistema de iluminação para evitar desperdício de energia, reduzir o excesso de luz nos espaços e contribuir para um menor impactoambiental. Posto isto, foram feitas análises das condições luminotécnicas e verificou-se que as mesmas atenderam as normas e as demais recomendações pertinentes à preservação da fauna e da flora.

*Palavras chave:* *Poluição luminosa, projeto luminotécnico, espaços públicos.*

**Abstract** – *The work aims to elaborate a proposal for the public lighting system of three fringes in the region of Grande Vitória, located in the state of Espírito Santo, Brazil, in order to reduce Light Pollution following the guidelines of the literature and the current regulation on public lighting in the country. The research was divided into two parts, the first phase being the analysis of the general characteristics and data collection of the studied places and, in the second, the presentation of the project proposal, with the aid of the DIALux software. The project was developed with an adequate choice of lighting system to avoid wasting energy, reduce excess light in spaces and contribute to less environmental impact. That said, analyzes of the lighting conditions were carried out and it was found that they met the standards and other recommendations relevant to the preservation of fauna and flora.*

*Key Words:* *Light Pollution, lighting design, public spaces*

## 1. Introdução

As cidades estão crescendo e com o aumento da população mundial as áreas urbanizadas estão ficando cada vez mais numerosas. Contudo, a insegurança para quem mora nos centros urbanos também é um fator preocupante que intimida a nossa sociedade há anos, o que provoca um apelo da população por locais mais bem iluminados, visto que trazem uma maior sensação de segurança<sup>[1]</sup>.

Observando as áreas urbanas, pode-se dizer que esses espaços estão sendo contaminadas pelo demasiado uso de iluminação em suas vias, principalmente em áreas com apelo turístico ou com grande fluxo de pessoas<sup>[2]</sup>. As áreas litorâneas urbanizadas da Grande Vitória, região metropolitana do Espírito Santo, no sudeste do Brasil, não são exceções e essa exorbitância de luz é negativa e pode provocar malefícios e sinalizar desperdícios de energia<sup>[3]</sup>.

A poluição luminosa é um tipo de contaminação que acontece devido a um excesso de luz artificial exposta a um determinado lugar, o que ocasiona em problemas no ecossistema, agride a saúde, interfere na astronomia, dentre outros pontos negativos.<sup>[3]</sup>

Na fauna, esse excesso de luz pode ocasionar alterações no ecossistema. A mudança da iluminação ambiental em determinados locais pode gerar mudanças na orientação e atração dos organismos encontrados nesses locais<sup>[4]</sup>. No que diz respeito a flora, o impacto é encontrado nas plantas que não florescem se o período da noite for menor que a duração normal, ou seja, ela precisa tanto da iluminação quanto da escuridão, ambos são essenciais para o seu desenvolvimento. Enquanto isso, algumas podem florescer prematuramente devido a esse fator<sup>[5]</sup>. O impacto também chega ao homem, causando alterações dos ciclos circadianos. Há suspeitas de que as fontes de luz energéticas podem ocasionar em alterações do metabolismo e gerar doenças degenerativas<sup>[6]</sup>.

Assim como as outras áreas, a astronomia por sua vez também tem seus problemas. A poluição luminosa tem como efeito imediato a criação de um véu sobre as cidades que interfere na vida silvestre e impede a observação astronômica<sup>[7]</sup>. Um estudo que propõe a análise de um produto educacional para o ensino da astronomia afirma que no estado do Espírito Santo há um excesso de luz provenientes da região da Grande Vitória e da cidade de Aracruz. Ao realizar uma expedição nos balneários vizinhos - Pontal do Ipiranga ao norte e Regência ao – o autor alega a facilidade na identificação dos pontos de poluição luminosa desses espaços. A região foi considerada inapropriada para observação astronômica por ter parte do horizonte celeste ineficaz a esse tipo de estudo<sup>[8]</sup>.

Em razão dessa atenção necessária, a pesquisa analisou as condições atuais da iluminação artificial de três orlas da região que contém iluminação no calçadão e na faixa de areia. Os locais selecionados foram as orlas de Camburi, na cidade de Vitória, de Itaparica, na cidade de Vila Velha e de Jacaraípe na cidade de Serra. O objetivo deste trabalho é propor um projeto mais adequado para cada cenário e analisar seu resultado, conforme recomendações da NBR 5101<sup>[9]</sup>, a fim de reduzir a poluição luminosa e o desperdício de energia.

## 2. Abordagem Metodológica

A metodologia foi dividida em duas etapas, sendo a primeira uma etapa de análise das características de cada local, com identificação da malha viária, urbanização, posição dos postes e a direção das luminárias em cada trecho dessas três orlas. Nessa etapa foram recolhidos dados e informações sobre a iluminação do local nos arquivos das respectivas prefeituras, além de análises visuais realizadas *in loco* e através de imagens com auxílios do Google Earth. A segunda etapa do trabalho consiste na elaboração e avaliação de uma nova proposta de projeto para esses espaços, com o intuito de reduzir a poluição luminosa, contribuir para a fauna e flora locais e evitar desperdício de energia. Nessas intervenções foram analisadas a uniformidade e a iluminância média conforme recomendação da NBR 5101<sup>[9]</sup>.

Esta norma técnica define algumas características da iluminação das vias através de sua classificação, sendo de V1 a V5 para veículos e para pedestres de P1 a P4. Essa classificação é determinada pela função da via, densidade de tráfego, complexidade do tráfego, separação do tráfego e existência de facilidades para o controle do tráfego, como os sinais.

A plataforma usada para simulação e avaliação dos resultados foi o DIALux, software consolidado no mercado para elaboração de projetos luminotécnicos.

Devido às dimensões das 3 orlas e o tempo disponível para o desenvolvimento da pesquisa, proveniente de um Trabalho de Conclusão de Curso, foi selecionado 1 trecho típico de cada orla e, em seguida, desenvolvida a proposta de iluminação. Foram simulados diferentes modelos de luminárias e configurações de postes. Neste artigo são apresentados apenas os modelos que obtiveram o melhor resultado dentre os avaliados. Nas simulações foram analisadas a uniformidade média e as iluminâncias média e mínima (lux) e, a partir desses dados, foi possível avaliar o atendimento aos valores definidos pela norma técnica.

Para investigação da iluminância e uniformidade, de acordo com a NBR 5101<sup>[9]</sup>, foi configurada uma malha de pontos, definida pelas interseções das linhas transversais e longitudinais à pista de rolamento e às calçadas, levando em consideração a linha transversal alinhada com cada luminária; uma linha transversal no ponto médio entre as duas luminárias; uma linha longitudinal no eixo de cada faixa e uma linha longitudinal no eixo da calçada. Com a configuração adequada, nos dados de saída do software DIALux é fornecido o resultado completo dos níveis de iluminância e uniformidade.

## 3. Definição e análise dos locais de intervenção

Para uma maior percepção da atual situação em que se encontra os espaços aferidos, foram realizadas visitas *in loco*, definidos os locais de intervenção e elaboradas plantas e desenhos esquemáticos para melhor compreensão de cada trecho analisado das orlas selecionadas para o estudo.

### A. Orla de Camburi

O primeiro local analisado é a orla da Praia de Camburi, em Vitória-ES, que compreende três bairros e possui uma extensão de quase 6km. A área selecionada para estudo está em uma região com um considerável fluxo de carros e pessoas.

Como mostra na Fig. 1, o trecho é composto por um calçadão de quase 9 metros de largura, uma ciclovia, uma faixa de vegetação de aproximadamente 7 metros de largura e duas vias, sendo uma com 5 faixas de rolamento e a outra com 4 faixas, separadas por um canteiro central que possui entorno de 2,5m.



Fig. 1 – Planta Baixa esquemática da orla de Camburi com indicação dos postes de iluminação

O número 1, identificado na figura em amarelo, se refere aos postes altos com braços duplos com um distanciamento entre postes de aproximadamente 40m. O número 2 é referente a postes altos com braços duplos, mas de alturas distintas, com uma luminária direcionada para a ciclovia e outra para o calçadão, com um distanciamento aproximado entre postes de 45m. Já os postes identificados com o número 3 referem-se aos postes altos com suporte de 5 refletores direcionados para a faixa de areia, sendo a distância entre eles em torno de 50m. Através do corte esquemático representado na Fig. 2 é possível analisar a situação atual desse espaço.

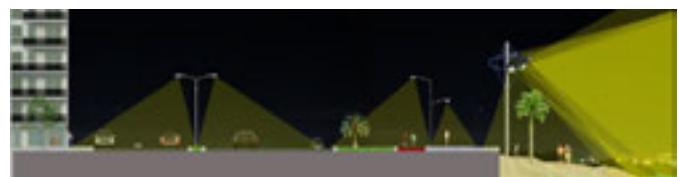


Fig. 2 – Corte esquemático da orla de Camburi, Vitória/ES

### B. Orla de Itaparica

Essa orla do litoral de Vila Velha possui extensão aproximada de 5km. O trecho escolhido para a análise foi o cruzamento existente entre a rua Dr. Gilson Santos e a avenida Est. José Júlio de Souza no bairro de Praia de Itaparica.

Como ilustrado na Fig. 3, a orla é composta por um calçadão de quase 5 metros, uma ciclovía, um canteiro central e duas vias, sendo a mais próxima a praia com 2 faixas de rolamento e 1 de estacionamento e totalizando com quase 9 metros enquanto a via mais afastada possui também 2 faixas de rolamento e 1 de estacionamento entretanto dispõe de quase 2 metros a mais.

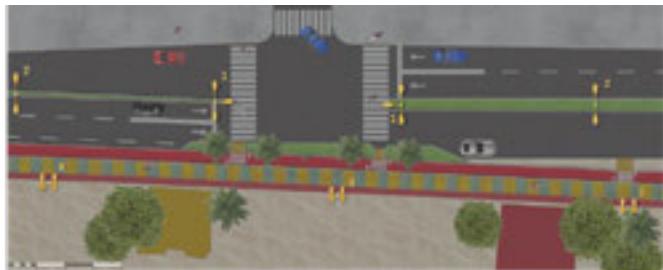


Fig. 3 - Planta Baixa esquemática da orla de Itaparica com indicação dos postes de iluminação

Os postes identificados com o número 1 são altos e com braço triplo, posicionados em cruzamentos; O número 2 são os postes altos, idênticos ao anterior, mas com braço duplo e distanciamento aproximado de 35m entre eles. E por último, o número 3 é referente aos postes altos com suporte para seis luminárias, duas em direção ao calçadão e a via e as demais direcionadas para a faixa de areia, com um afastamento de aproximadamente 50m entre eles. Através do corte esquemático representado na Fig. 4 é possível observar a situação atual do direcionamento da luz nesse trecho.

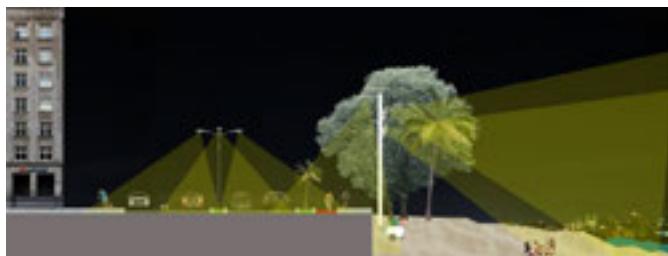


Fig. 4 - Corte esquemático da orla de Itaparica, Vila Velha/ES

### C. Orla de Jacaraípe

A última orla está localizada no bairro Parque Jacaraípe no município de Serra. Diferente das outras duas orlas citadas, a orla de Jacaraípe é composta por um calçadão com larguras variadas devido ao seu desenho irregular ao longo de sua extensão. A Fig. 5 mostra que a orla abriga uma ciclovía, um canteiro central com aproximadamente 1m, apenas uma via

com 1 faixa de estacionamento e uma única faixa de rolamento em sentido ao bairro Estância Monazítica, sendo que essa configuração da via possui uma extensão de 2km.

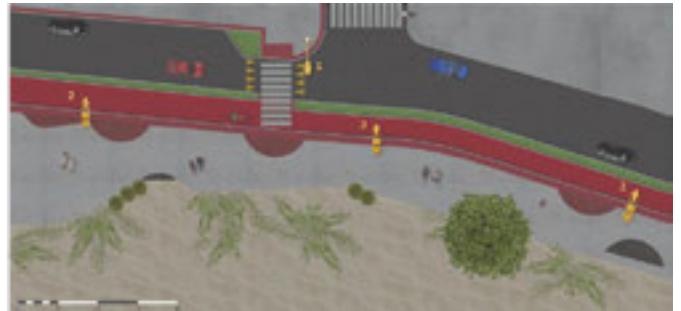


Fig. 5 – Planta Baixa esquemática da orla de Itaparica com indicação dos postes de iluminação

Em relação a identificação dos postes, o número 1 é referente ao poste com braço, com afastamento de aproximadamente 35m entre eles. O número 2 refere-se ao poste alto com suporte para 3 luminárias em 3 direções distintas, sendo a primeira voltada para a ciclovía e a via, a segunda entre o calçadão e a faixa de areia e a terceira direcionada para a faixa de areia, com um afastamento entre postes de aproximadamente 30m. Através do corte esquemático representado na Fig. 6 é possível observar a situação atual da iluminação desse trecho.

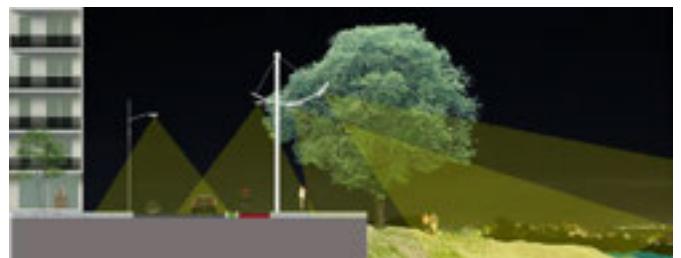


Fig. 6 – Corte esquemático da orla de Jacaraípe, Serra/ES

### D. Análise geral

É perceptível a diferença entre as três orlas examinadas, seja pelo número de vias e suas dimensões, formatos dos calçadões, design dos postes e luminárias, fluxo de pessoas e carros ou pela quantidade e altura das edificações. Cada região tem as suas especificidades.

Entretanto, em todos os trechos analisados, foram observados refletores voltados para a faixa de areia e direcionando parte do seu fluxo luminoso para o mar e o céu, conforme observado nas Fig. 2, 4 e 6, desperdiçando energia para iluminar áreas desnecessárias e trazendo prejuízos para a fauna e a flora da região.

### 4. Projeto Luminotécnico

A partir da análise previa, foram propostas intervenções no sistema de iluminação dos trechos, através da elaboração de modelos desenvolvidos no DIALux, para simulação e

avaliação da iluminação nessas áreas. Para isso, foram definidos postes e luminárias específicas para iluminação das diferentes áreas, compostas por pista de rolamento, calçadão, ciclovia e canteiros, sendo que cada orla apresenta sua respectiva configuração. Também foi elaborada uma proposta independente para as faixas de areia, cujas características de uso são similares nas 3 orlas.

Com a intenção de descobrir uma melhor opção para cada cenário, foram testadas diversas luminárias com diferentes alturas de montagem, de distintos fabricantes, para se obter um resultado que se adequasse à norma técnica responsável pela avaliação da iluminação pública do país. Dessa forma, os resultados apresentados neste trabalho são referentes a um modelo de luminária, diferente para cada situação, cujo desempenho se mostrou eficaz. Os nomes das luminárias foram omitidos a fim de preservar seu modelo e fabricante, mas, na Fig. 7 estão identificadas as curvas de distribuição fotométricas das luminárias simuladas.

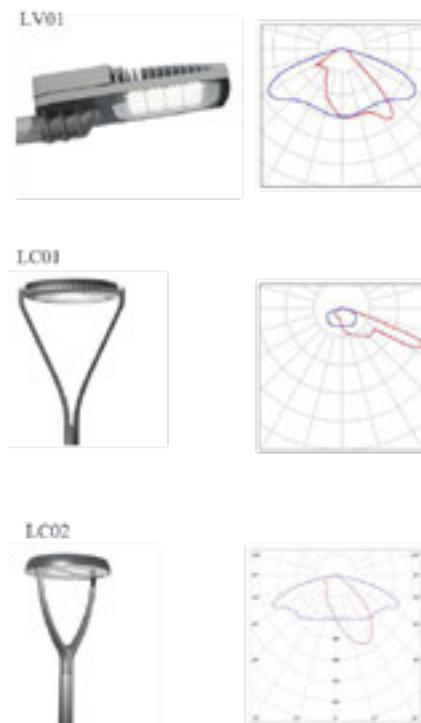


Fig. 7 – Curva de cada luminária usada no projeto

#### A. Orla de Camburi

Para uma maior atenção com relação à poluição luminosa nessa orla, foi proposta a retirada de todos os refletores localizados na faixa de areia visto que os mesmos podem prejudicar a fauna e a flora desses espaços [4].

Para a iluminação do calçadão, da ciclovia, foram propostos postes com 4,5 metros de altura de montagem da luminária e com um distanciamento de 25 metros, intercalados dos dois

lados do calçadão. Os postes do canteiro central projetados com distanciamento de aproximadamente 40m entre eles e altura de montagem de 10 metros, com suporte para as luminárias. Os postes designados para as vias agora comportam a luminária identificada como LV01, enquanto os postes do calçadão acomodam a luminária LC01.

De acordo com a NBR 5101<sup>[9]</sup>, a via da orla de Camburi se caracteriza como classe V2, cuja iluminância média deve alcançar 20 lux e o fator de uniformidade mínimo de 0,3. Foram elaboradas 3 tramas de cálculo, conforme orientação da norma técnica, para essa orla, sendo uma para cada lado da via e uma para o calçadão. Porém, os resultados das simulações foram representados em gráficos para melhor visualização.

Os resultados encontrados podem ser analisados através da Fig. 8 apresentada abaixo. O primeiro trecho analisado atingiu iluminância média de 33 lux e fator de uniformidade de 0,32. A segunda área, obteve iluminância média de 26 lux e uniformidade de 0,3, enquanto na terceira trama, atingiu-se 20 lux de iluminância média e 0,3 de uniformidade.

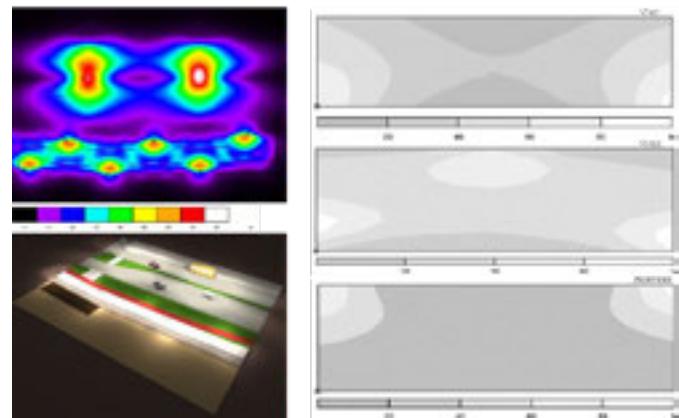


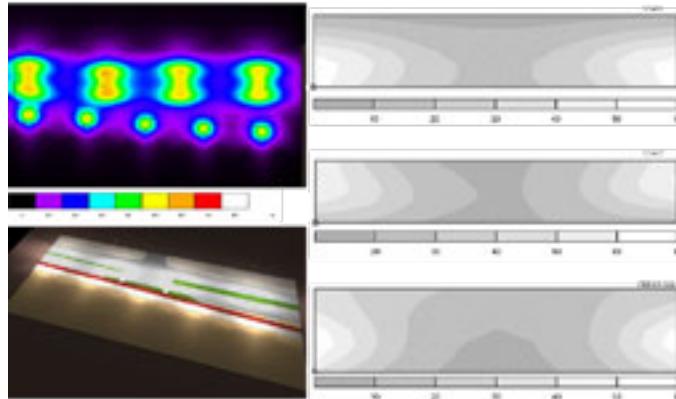
Fig. 8 – À esquerda estão apresentados as Cores falsas e a representação em 3D, abaixo. À direita apresenta os níveis de cinzento dos três trechos simulados, via, via e calçadão, respectivamente

#### B. Orla de Itaparica

Para este cenário, também foi proposta a retirada de todos os postes do calçadão para o posicionamento de novos postes de 6 metros de altura de montagem da luminária com um distanciamento de 30 metros entre eles. Assim como na orla de Camburi, os postes dos canteiros centrais foram definidos com o mesmo distanciamento dos postes existente e altura de montagem de 10m. Vale ressaltar que os postes com braços triplos localizados em cruzamentos foram substituídos por braços duplos. Os postes responsáveis por iluminar as vias comportam a luminária LV01, a fim de preservar seu modelo e fabricante. Já os postes do calçadão acomodam a luminária LC02.

De acordo com a legislação as vias da orla de Itaparica estão caracterizadas como classe V2, e a via destinada a pedestre como P1, ambas possuindo iluminância média de 20 lux e o fator de uniformidade mínimo de 0,3. Foram elaboradas 3 tramas de cálculo para essa orla, sendo uma para cada lado da via e uma para o calçadão.

A primeira trama de cálculo atingiu iluminância média de 25 lux e fator de uniformidade de 0,31. A segunda área, obteve iluminância média de 32 lux e uniformidade de 0,54, enquanto na terceira trama, atingiu-se 22 lux de iluminância média e 0,34 de uniformidade. Os resultados encontrados podem ser observados da Fig. 9, apresentada abaixo.



### C. Orla de Jacaraípe

Para uma melhor atuação da iluminação desse espaço, está sendo proposto para o novo projeto a retirada de todas as luminárias localizadas no calçadão e na calçada cidadã. O novo planejamento é formado apenas por postes de 7,5m de altura com distâncias de 40m locados no canteiro lateral entre a via e a ciclovia.

A luminária escolhida para este trecho foi a LV01. Essa posição atende a ambas as faixas, entretanto, devido a irregularidade do calçadão, foi considerado apenas 5 metros de largura, ponto médio entre o trecho escolhido.

De acordo com a norma, a via desse cenário é classificada como V3 possuindo iluminância média de 15 lux e o fator de uniformidade mínimo de 0,2, já a via dos pedestres, assim como nos outros dois casos, a norma classifica o calçadão como P3, onde possui a iluminância média de 20 lux e o fator de uniformidade mínimo de 0,3. Pelo fato da orla de Jacaraípe possuir apenas uma faixa de rolamento, foram distribuídas apenas duas malhas de pontos.

Sendo assim, a primeira trama de cálculo atingiu iluminância média de 25 lux e fator de uniformidade de 0,31. A segunda

área, obteve iluminância média de 32 lux e uniformidade de 0,54. Os resultados encontrados podem ser analisados através da Fig. 10 apresentada abaixo.

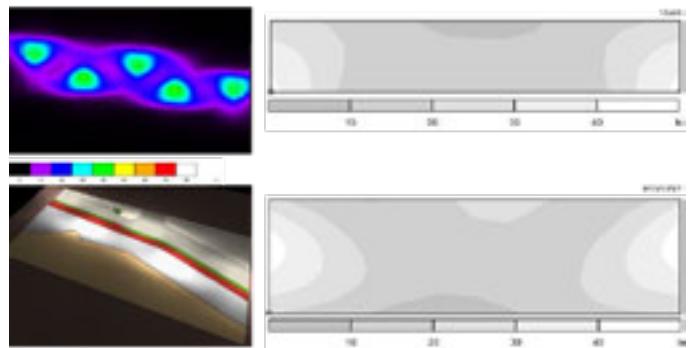


Fig. 10 – À esquerda estão apresentados as Cores falsas e a representação em 3D, abaixo. À direita apresenta os níveis de cinzento dos dois trechos simulados, via e calçadão, respectivamente

### D. Proposta para as faixas de areia

É visível o motivo pelo qual as faixas de areia são bem iluminadas. O lazer noturno virou um hábito comum do homem devido as suas ocupações no período diurno. A iluminação de grandes áreas nas areias das praias provoca assim um grande consumo de energia no período em que há ausência da luz natural, horário em que parte da população ocupa apenas alguns pontos da praia para prática de esportes ou lazer. Porém, já foram destacados nesta pesquisa alguns impactos negativos provocados por essa exorbitância luminosa, seja em peixes, como no exemplo do peixe palhaço na Austrália<sup>[10]</sup>, nas tartarugas marinhas no estado do Espírito Santo<sup>[11]</sup> ou mesmo no ser humano, que habita e faz uso das orlas do planeta.

Para um melhor proveito da junção desses dois fatos foi proposta uma solução para que o uso noturno ainda seja habitual, porém com mais prudência. A primeira alteração proposta foi modificar a altura dos postes de acordo com o sugerido na cartilha sobre Fotopoluição do projeto Tamar<sup>[11]</sup>, e os tipos de luminária para diminuir a distribuição excessiva de luz. A fim de controlar e otimizar o uso da luz nessas áreas, podem ser utilizadas luminárias com controle e limitação de fluxo luminoso, com telegestão ou sensor de presença em lugares com pouco movimento e para as áreas com um número maior de atrativos tal como jogos, passeios, caminhadas, entre outros, além de limitar o horário de funcionamento desse sistema de iluminação.

Vale ressaltar que essa proposta poderia se adaptar a qualquer orla que tenha perfis similares aos cenários estudados nessa pesquisa, desde que sigam as diretrizes supracitadas, limitando a dispersão da luz e reduzindo significativamente os impactos causados pela Poluição Luminosa.

Na simulação representada na Fig. 11 é possível analisar um exemplo da aplicação dessa proposta de iluminação com facho de luz direcionado para as faixas de areia, que podem ser controlados com anteparos instalados na própria luminária.

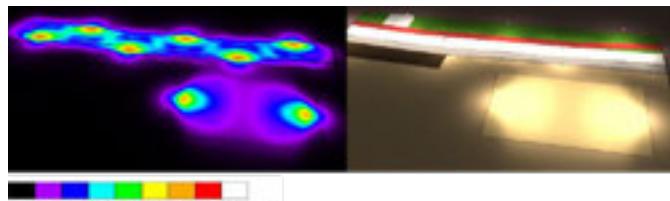


Fig. 11 - Exemplo de aplicação de iluminação para faixa de areia em cores falsas, à esquerda, e em simulação 3D, à direita

Reforça-se a ideia de que este é um dos possíveis exemplos de aplicação para esses espaços, sendo necessária uma adequação ao uso e às características locais em caso de sua aplicação em outras situações.

## 5. Conclusão

Foi possível observar na pesquisa que muitas áreas urbanas fazem o uso de luz artificial em excesso o que ocasiona impactos sociais, econômicos, no meio ambiente, na fauna e a flora e no ser humano. Devido à essas preocupações, é de suma importância que sejam desenvolvidas mais pesquisas nessa temática para debater e abordar o tema, esclarecendo as implicações da poluição luminosa.

O presente trabalho partiu da hipótese de que são desenvolvidos projetos de iluminação preocupados com o uso dos espaços e a segurança da população, mas que na prática utilizam conceitos equivocados para a iluminação de determinadas regiões, como luz em excesso e sem controle do facho de luz. A pesquisa teve algumas limitações no que se refere à investigação *in loco* devido à pandemia que nos assola, mas foi possível observar o desperdício e o descuido com a iluminação direcionada para as faixas de areia e para o oceano.

Esse fator revela o descaso dos projetos luminotécnicos desenvolvidos para as orlas e não se preocupa com as consequências e os impactos ambientais que são gerados. Entretanto, este trabalho demonstra que é possível desenvolver um projeto de iluminação menos impactante e mais eficiente.

Sendo ainda assim recomendado que sejam desenvolvidas pesquisas futuras nesses locais, objetos da pesquisa, para que haja uma verificação dos níveis de iluminância. Isso poderia colaborar com a comprovação da hipótese inicial da pesquisa, reforçando a necessidade de propor intervenções no sistema de iluminação dos cenários escolhidos para esse estudo.

## 6. Referencial Bibliográfico

[1] MASCARÓ, Lúcia. **A Iluminação do Espaço Urbano**. Editora Masquatro Editora Ltda. Porto Alegre, RS, Brasil, 2006.

[2] GOMES, R. C. & FERNANDES, I. P. Análise quantitativa da iluminação pública na orla de João Pessoa. Anais do XV ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2019, p. 2659-2666.

[3] LNA, **Laboratório Nacional de Astrofísica do Brasil** – Disponível em <<http://www.lna.br/lp/>>. Acesso em 18 ABR 2020.

[4] LONGCORE, T. & RICH, C. Ecological light pollution. The Ecological Society of America, Los Angeles, Estados Unidos, 2004.

[5] HOUSE OF COMMONS, Light Pollution and Astronomy, Science and Technology Committee Publications – Volume 1, Londres, Inglaterra, 2003.

[6] STEVENS, Richard G. Circadian Disruption and Breast Cancer: From Melatonin to Clock Genes, Epidemiology: March 2005 - Volume 16 - Issue 2 - p 254-258.

[7] SANTOS, E. R. dos. A Iluminação pública como elemento de composição da paisagem urbana. 109p. 2005. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curitiba, 2005.

[8] SANTOS, Igor Bellucio. O que existe no universo?. Dissertação (Mestrado nacional profissional em ensino de física) – Universidade Federal do Espírito Santo, Cariacica, 2019.

[9] FOBERT, Emily K.; SILVA, Karen Burke; SWEARER, Stephen E. Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish. Biology Letters 15. The Royal Society. JUN/2019.

[10] TAMAR, **Projeto Tamar**. Saliés, Eduardo. et al. Cartilha de Fotopoluição. Bahia, [?]. Disponível em: <[http://tamar.org.br/arquivos/cartilha%20fotopoluicao\\_V2014.pdf](http://tamar.org.br/arquivos/cartilha%20fotopoluicao_V2014.pdf)>. Acesso em: 14 jun 2020.

[11] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5101/2018: Iluminação pública – procedimento. Rio de Janeiro, 2018

## 7. Biografia

Juliana Ferreira Nunes, Arquiteta e Urbanista, graduanda em Arquitetura e Urbanismos na FAESA – Faculdades Integradas São Pedro.

Ricardo Nacari Maioli, Arquiteto e Urbanista, Mestre em Engenharia Civil, componente do quadro técnico de arquitetos da Universidade Federal do Espírito Santo e docente da graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAESA - Faculdades Integradas São Pedro

# Nuevas propuestas de aplicación para mejorar la actual normativa de control de la contaminación lumínica en Chile

Pedro Galleguillos<sup>1,a</sup>, Javier Sayago<sup>2,b</sup>, Pedro Sanhueza<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio LAMBDA Spa, Chile

<sup>a</sup> [pgalleguillos@laboratoriolambda.cl](mailto:pgalleguillos@laboratoriolambda.cl)

<sup>2</sup> Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile-OPCC, Chile

<sup>b</sup> [jsayago@opcc.cl](mailto:jsayago@opcc.cl)

<sup>c</sup> [psanhueza@opcc.cl](mailto:psanhueza@opcc.cl)

**Resumen**—Desde hace más de dos décadas, Chile cuenta con una reglamentación especial que tiene como fin preservar la calidad de sus cielos nocturnos. Por un lado, el desarrollo urbanístico ha significado la presencia de alumbrado en zonas en que antes no había, aumentando con ello los niveles de brillo en el cielo; mientras que por otro lado, los avances tecnológicos han implicado un cambio en los paradigmas aplicados al alumbrado de exteriores lo que a su vez ha llevado a la necesidad constante de revisar y actualizar los parámetros normados a fin de minimizar el impacto.

La aplicación de estas normas ha estado circunscrita de manera específica a ciertas regiones del norte del país, una zona que debido a sus condiciones geográficas presenta un clima ideal para la observación astronómica, razón por la cual en la actualidad Chile concentra más del 50% de la capacidad de observación a nivel mundial. Sin embargo, pese a los esfuerzos realizados, los factores anteriormente mencionados han tenido un impacto negativo para las condiciones de calidad de los cielos nocturnos del país.

Dado que la normativa de protección del cielo nocturno con aptitud astronómica es de tipo ambiental, le corresponde al Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA) coordinar el proceso de revisión formal del actual decreto. Ante la evidencia de impactos negativos en el medio natural y a los seres humanos derivados de la iluminación, se ha optado por ampliar el objetivo normativo y extender el alcance de protección ante la contaminación lumínica a todo el territorio nacional y endurecer los requerimientos en zonas consideradas como de alto valor científico para la investigación astronómica y también para áreas silvestres protegidas y sus entornos.

El presente trabajo resume las propuestas presentadas para este objeto por parte de la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile - OPCC- basadas en la propia experiencia institucional desde los inicios de la reglamentación y sus vínculos con los más importantes consorcios de observación astronómica a nivel mundial.

**Palabras clave.** Contaminación lumínica, Reglamentos de alumbrado, Eficiencia energética, Protección medio ambiente.

**For more than two decades, Chile has had a special regulation that aims to preserve the quality of its night skies. The urban development has meant the presence of lighting in areas that previously did not exist, increasing the skyglow; also, technological advances have implied a change in the paradigms applied to outdoor lighting, which in turn has led to the constant need to review and update the regulated parameters in order to minimize the impact.**

**The application of these norms has been specifically circumscribed to certain regions in the north of the country, an area that due to its geographical conditions presents an ideal weather for astronomical observation, which is why Chile currently concentrates more than 50% of observing capacity worldwide. But despite the efforts made, the aforementioned factors have had a negative impact on the quality conditions of the country's skies.**

**The Ministry of Environment of Chile is coordinating a process to review the current decree with the aim of extending the scope of protection against light pollution to the entire national territory and tightening the requirements in areas of great scientific value and in protected wild areas and their surroundings.**

*This paper summarizes the proposals presented for this purpose by the Oficina de Protección de la calidad del Cielo del Norte de Chile -OPCC-based on its own institutional experience since the beginning of the regulation and its links with the most important consortia of astronomical observatories worldwide.*

**Key Words.** Light pollution, Lighting standard, Energy efficiency, Environmental protection

## 1. Introducción

Con la entrada en vigencia del Decreto Supremo N°043 del año 2012 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, que establece la norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica (D.S. N°043/2012/MMA), el sistema normativo definió responsabilidades específicas destinadas a procesos previos a la instalación de artefactos de iluminación en aplicaciones de exterior; y responsabilidades específicas destinadas al control y fiscalización de las instalaciones en las regiones afectas. Además, incorporó nuevas restricciones espectrales en respuesta a la agresiva entrada al mercado de sistemas de iluminación con fuentes de estado sólido (SSL) y el uso de fuentes de luz blanca en aplicaciones de exterior.

Sin embargo, pese a lo anterior, el crecimiento sostenido de asentamientos urbanos y los nuevos paradigmas asociados a la iluminación de exteriores mediante el uso de SSL, han llevado a la necesidad de revisar y actualizar el actual decreto que regula la contaminación lumínica con la finalidad de minimizar el impacto que tienen estos.

Desde ya varios años atrás que Chile tiene una muy ambiciosa “Agenda de Energía”, la cual contempla diversos objetivos de mediano y largo plazo, apuntando de manera específica a una reducción del consumo energético del país, a través de variadas iniciativas que fomentan el desarrollo de políticas públicas y acciones orientadas a aumentar la eficiencia energética, contrastando así el efecto directo producido por el aumento sostenido en la demanda de energía eléctrica. El fomento a la diversificación en la generación de energía eléctrica, la creación de nuevas unidades gubernamentales orientadas de manera específica a estos temas y la promulgación de reglamentos actualizados en materia de eficiencia energética, entre otras iniciativas, son un ejemplo del trabajo y políticas llevadas a nivel de Estado. En esa línea es que en la actualidad el Ministerio del Medio Ambiente de Chile

coordina un proceso de revisión del actual decreto que regula la emisión de contaminación lumínica en tres regiones del norte del país con el objetivo de extender el alcance de protección a todo el territorio nacional y endurecer los requerimientos en zonas consideradas como de alto valor científico e investigación astronómica y áreas silvestres protegidas y sus alrededores.

Buena parte de los análisis como las propuestas presentadas en este documento, corresponden a información generada por la unidad consultora de Laboratorio LAMBDA Spa para la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo de Chile (OPCC), y forman parte de las presentaciones que OPCC ha ejecutado frente a la autoridad nacional en su rol de agente activo para la reducción y prevención de la contaminación lumínica.

## 2. Situación actual

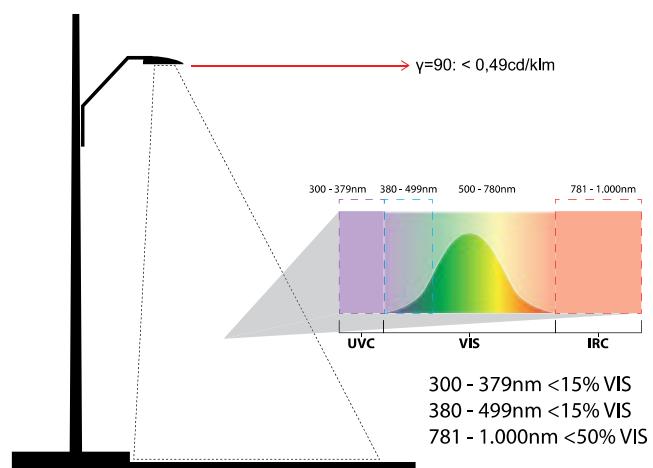
El control de los aspectos regulados en el D.S. N°043/2012/MMA se establece mediante un sistema de certificación previo a la instalación de luminarias o proyectores en cualquier área exterior ubicado en las II, III y IV región del Norte de Chile; y mediante la verificación del cumplimiento en terreno de letreros luminosos instalados en la zona, por lo cual el control está supeditado a la naturaleza del producto a evaluar. El caso de certificación de Luminarias de uso exterior corresponde al eje que más énfasis en desarrollo ha tenido y el único que a la fecha se encuentra operativo mediante la acción y vigencia de los Protocolos PCL N°1 y PCL N°2 de la Superintendencia del Medio Ambiente (organismo parcialmente dependiente del Ministerio del Medio Ambiente al cual le corresponde de forma exclusiva ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental, de las medidas de los Planes de Prevención y/o de Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad Ambiental y Normas de Emisión, y de los Planes de Manejo), que describen los procedimientos aplicables a procesos de certificación de productos de iluminación destinados al alumbrado de exteriores que utilicen como tecnología de iluminante fuentes incandescentes o de descarga de gases, y fuentes de estado sólido respectivamente. En lo que respecta a la verificación del cumplimiento de los límites de luminancia en el caso de letreros luminosos e iluminados, a la fecha no existe ningún protocolo oficializado por SMA.

### A. Sistema de Certificación

Existen dos vías o alternativas para la certificación de productos desde el punto de vista de la contaminación lumínica. La principal vía (y mayormente considerada), se basa en el control de muestras representativas de lotes de producción semestrales. Es decir, para obtener la aprobación es necesaria la medición de una muestra “Tipo” representativa de una familia de productos y la medición de muestras de

“Seguimiento” extraídas de un lote de producción acotado a un tiempo de 6 meses.

Los aspectos técnicos de relevancia verificados en estos procesos son dos y están definidos en los artículos n°6 y n°7 del D.S. N°043/2012/MMA. Estos son: 1. Verificación del límite de emisión de intensidad luminosa hacia el hemisferio superior, es decir, mediante gonio fotometría verificar que en elevaciones de gama ( $\gamma$ ) igual a 90 grados no se exceda un límite de 0,49cd/klm de lámpara, y que no exista emisión alguna en elevaciones gama mayor a 90 grados; y 2. Verificación del límite de emisión de radiancia espectral, es decir, mediante espectro radiometría verificar que la emisión espectral no exceda: un 15% en el rango entre 300 y 379nm respecto de la radiación emitida en el rango visible (380 a 780nm); un 15% en el rango entre 380 y 499nm respecto de la radiación emitida en el rango visible; y un 50% de en el rango entre 781 y 1000nm respecto de la radiación visible.



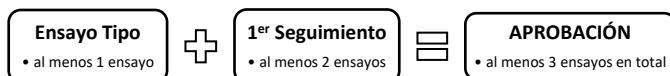
Para la aprobación del Tipo se deben ejecutar todos los ensayos y/o análisis anteriormente descritos a una muestra por cada combinación entre sus componentes y características del conjunto óptico del producto a ensayar, y sus resultados estar en consonancia a las disposiciones de los artículos 6º y 7º del D.S. N°43 del 2012 MMA. La aprobación del Tipo constituye un primer paso para la obtención de la aprobación, pero en sí misma no es válida como un certificado de aprobación. Por lo tanto el producto que ha logrado pasar con éxito los ensayos definidos para este proceso en términos legales aún no puede ser considerado como aprobado, pues requiere además de una verificación de la producción.

La aprobación del seguimiento ocurre tras ejecutar los mismos ensayos y/o análisis efectuados en la muestra tipo, a N cantidad de muestras por cada combinación entre sus componentes y características del conjunto óptico del producto a ensayar. El tamaño de la muestra va a depender de la cantidad

de luminarias que se declaren en la respectiva partida de producción o importación.

La selección de la(s) muestra(s) se debe ejecutar en base a la Norma Chilena Nch. 43 Of61 “Selección de muestras al azar”. Por lo tanto, se entiende que debe existir ya una partida o lote de productos ya fabricados o importados para poder ejecutar estos controles.

Luego, la aprobación de la(s) muestra(s) de control regular tomada de la partida de fabricación o de la partida de importación se da si sus resultados están en consonancia a las disposiciones de los artículos 6º y 7º del D.S. N°43 del 2012 MMA. Al cumplirse con el primer seguimiento y sucesivamente, se emitirán los correspondientes Informes de Seguimiento, los cuales ampararán a toda la partida de fabricación y/o importación durante la vigencia del mismo, por lo cual solo y cuando haya sido aprobada la primera partida de productos se podrá considerar al producto ensayado como APROBADO.



Los organismos de certificación acreditados por la autoridad tienen obligación de dar aviso a esta en caso de que algún producto ensayado para la obtención del Tipo NO cumpliera con las disposiciones reguladas en D.S. N°43 del 2012 MMA. En los casos de rechazo este sistema establece que si el fabricante y/o importador requiere volver a iniciar el proceso de certificación, el laboratorio de inspección deberá extraer en una segunda inspección una muestra igual al doble de la extraída en la inspección del control regular, en consonancia de la Norma Chilena Nch. 43 Of61, manteniéndose los niveles de aceptación definidos en la Tabla 4. Los protocolos establecen que si un lote es aprobado en una segunda inspección, el certificado respectivo deberá contener la leyenda “APROBADO EN SEGUNDA INSPECCIÓN” señalando a lo menos las causas del rechazo inicial. Si en el proceso de segunda inspección ocurriera un nuevo rechazo, el producto mantendrá el rechazo y esta información deberá ser remitida a SEC con copia a SMA. Así mismo pese a que el producto haya pasado con éxito la fase de Tipo, el producto se considerará como RECHAZADO.

La complejidad del sistema ha generado que en la práctica, la implementación se ejecute en base a la interpretación propia de cada organismo, sin una clara línea común, ya que es prácticamente imposible mantener lotes de producción almacenados durante 6 meses para poder obtener una aprobación de instalación. Muchos de estos problemas son un arrastre de vacíos o aspectos no considerados en la redacción de la actual normativa, los cuales se pretenden mejorar en el actual proceso de revisión.

## B. Sistema de fiscalización

Desde la entrada en vigencia del D.S. N°043/2012/MMA, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), ha ejecutado procesos específicos enfocados a la regulación del parque lumínico mediante oficios dirigidos a grandes empresas del rubro minero y petro-químico, de los cuales aún no existe información clara respecto del impacto y/o resultados. A la fecha, existen diversas propuestas de protocolos destinados a la ejecución de actividades de inspección y fiscalización de instalaciones presentadas a SMA que no han sido oficializados ni discutidos pues el sistema en sí se ha enfocado principalmente en reforzar los procesos previos a la instalación, lo que finalmente en la práctica significa que el D.S. N°043/2012/MMA pese a estar en vigencia, no puede ser aplicado en su totalidad.

## C. Impacto ambiental

Pese a la implementación de normativas, los nuevos avances en tecnologías de iluminación y el crecimiento demográfico han impactado negativamente en términos de contaminación lumínica. En base a estimaciones hechas en un estudio realizado en conjunto por profesionales de ISTIL (Light Pollution Science and Technology Institute Thiene, Italy), la Universidad de Santiago de Compostela (España), y la OPCC (Chile), considerando el aumento de población entre los años 2010 y 2020 para el año 2030 el brillo del cielo en La Serena y Coquimbo se incrementará un 55% aproximadamente y un 130% para el año 2040. Los gráficos a continuación son algunos ejemplos extraídos del análisis de datos me mediciones del brillo del cielo utilizando el procesamiento del satélite Suomi NPP en base al trabajo de Falchi [1], y muestran una tendencia al aumento entre los años 2012 y 2019 tanto en grandes ciudades como en La Serena (ver gráfica 1) y en localidades de índole más bien rural como Monte Patria (gráfica 3) lo que genera además una especial preocupación sobre todo en zonas aledañas a los principales centros astronómicos instalados en el país.

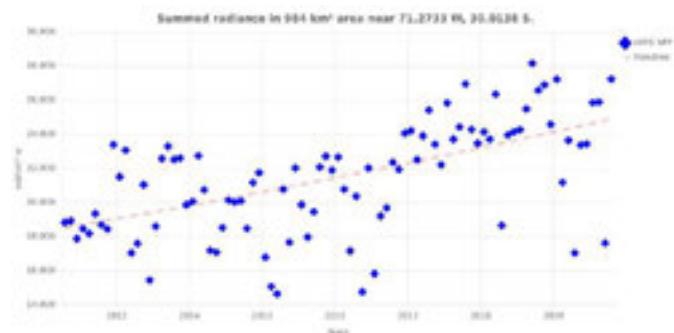


Gráfico 1, Avance del brillo del cielo en el área urbana de las ciudades de La Serena y Coquimbo, IV Región de Chile

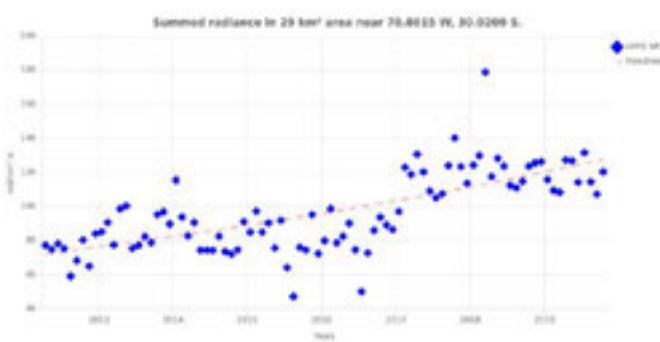


Gráfico 2 Avance del brillo del cielo en un área de 29km<sup>2</sup>, cercano a Ovalle, IV Región de Chile

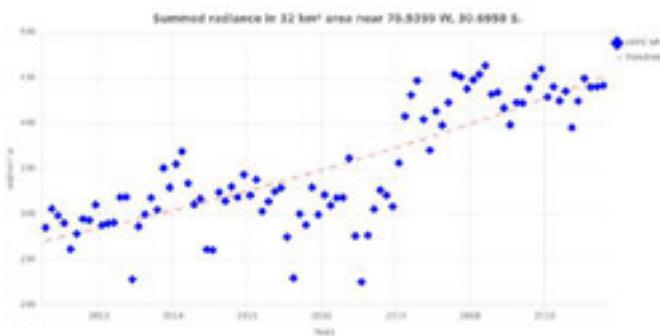


Gráfico 3, Avance del brillo del cielo en un área de 32km<sup>2</sup>, cercano a localidad de Monte Patria, IV Región de Chile

Esto no significa que las políticas implementadas hasta el momento hayan fracasado completamente, sino que justifica y reafirma la necesidad de mantener actualizadas las normativas a través de procesos de revisiones periódicas para asegurar una mejora continua, y justifica ante todo la necesidad de incrementar sustancialmente las actividades de fiscalización. El caso de la iluminación deportiva es un ejemplo de ello. En base a estimaciones hechas por la OPCC a principios del año en curso, existe un importante porcentaje de flujo luminoso emitido hacia el hemisferio superior por luminarias del tipo proyector con distribución fotométrica simétrica instalados con elevaciones desde los 45° hasta incluso 90° en algunos casos, lo que significa hasta un 33,5% del flujo total emitido por el conjunto de luminarias instaladas en un recinto tipo para la práctica amateur de Fútbol, y valores similares para otras disciplinas. Sumado a esto el prevalente uso de fuentes de luz en tonalidades neutras e incluso frías (por sobre 4.000°K) y la carencia de proyectos de iluminación que sustenten estas instalaciones.

### 3. Propuestas

Sobre la base de lo anteriormente expuesto, la OPCC ha desarrollado diversas propuestas enfocadas a mejorar el

sistema y/o contexto de aplicación desde la perspectiva de la reducción y prevención de la contaminación lumínica. Estas integran la experiencia vivida durante los años de aplicación del normativas y buscó mejorar aspectos carentes del sistema actual que en el pasado fueron materia de dobles interpretaciones, obstaculizando una implementación fluida de manera tal de permitir que exista cumplimiento al fin principal de estos decretos respecto del objetivo de protección ambiental y los resultados esperados de la norma.

#### A. Propuesta control por proyectos de iluminación

Actualmente, los reglamentos de alumbrado público de vías de tránsito peatonal y de vías de tránsito vehicular contenidos en los decretos N°2 del 2014 y N°51 del 2015 del Ministerio de Energía de Chile establecen que la elaboración de proyectos de alumbrado público, así como la ejecución, mantenimiento, modificación, recambio masivo y reparación de toda instalación de alumbrado público, solo deben ser realizados por instaladores eléctricos o por los profesionales autorizados en las clases A o B [2]. Sin embargo, no existe un proceso de verificación o validación previa a la instalación de proyectos.

Una instalación que no cumpla con los requerimientos de la normativa lumínica genera un gran impacto negativo ambiental inmediato. Si bien al aplicar acciones correctivas el efecto de mejora es inmediato, los altos costos asociados a estas acciones (que en la mayoría de los casos implican recambio de luminarias y operaciones en cada punto de iluminación), hacen que prácticamente sea imposible ejecutar estas acciones y en el caso de conseguirse implica un largo tiempo de litigios, tiempo en el cual el impacto sobre el medio ambiente y el derroche energético sigue existiendo.

Para evitar esto, se propone que todo proyecto de alumbrado de exterior destinado a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, requieran de una fase de evaluación de impacto ambiental (EIA) y que este incluya procesos de análisis al menos basados en la verificación del cumplimiento de las disposiciones del Artículo 8º del D.S. N° 043/2012 MMA. La revisión de estos aspectos puede ser ejecutada por profesionales dependientes de manera directa de la SMA, o bien mediante la subcontratación o designación de organismos de revisión competentes.

Con esta medida se pretende mitigar el aumento progresivo de los niveles de contaminación lumínica en los cielos del Norte de Chile, y aumentar los controles previos a la instalación o recambios masivos. Esta información también podrá ser útil para futuros procesos de fiscalización adoptados por la Superintendencia.

#### B. Propuesta de reducción de flujo luminoso programado

Los nuevos recambios de luminarias implican en un 100% la instalación de artefactos que utilizan tecnología LED. Si

bien, esta tecnología presenta grandes beneficios en términos de eficiencia, desde la perspectiva de la contaminación lumínica ha implicado en un gran impacto. En conjunto a esto, se ha vuelto a valorar la utilización de fuentes de luz blanca con buen rendimiento de color, lo que sin duda ha mejorado la percepción visual de los entornos en comparación a las instalaciones a base de fuentes de Sodio de Alta Presión.

Esta propuesta pretende aprovechar algunas de las características comunes de la tecnología LED, y su implementación requiere que las características técnicas de los artefactos a instalar incluyan como exigencia la utilización de drivers que permitan la regulación del flujo luminoso de salida de la luminaria.

Todas las marcas de driver existentes disponen de modelos que permiten variar el flujo luminoso de las fuentes LED.

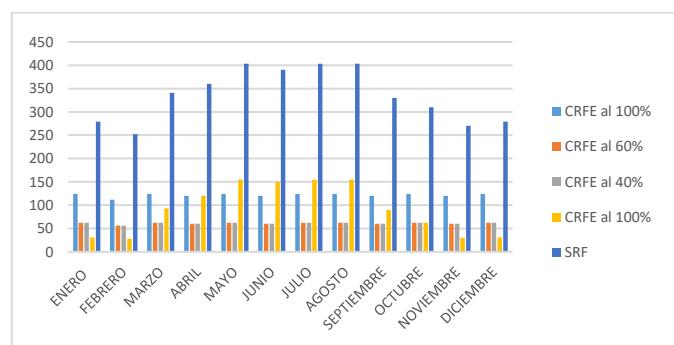
La tabla 1 a continuación resume la cantidad de horas típica en que permanece en funcionamiento de una instalación de alumbrado público en Chile por cada mes de un año convencional.

Tabla 1, Tiempo de encendido de luminarias

	Tiempo de encendido de luminarias		Hrs./Mes
MES	Hrs./Días	Días Mes	
ENERO	9	31	279
FEBRERO	9	28	252
MARZO	11	31	341
ABRIL	12	30	360
MAYO	13	31	403
JUNIO	13	30	390
JULIO	13	31	403
AGOSTO	13	31	403
SEPTIEMBRE	11	30	330
OCTUBRE	10	31	310
NOVIEMBRE	9	30	270
DICIEMBRE	9	31	279
Total		365	4.020

Los sistemas convencionales de reducción de flujo, se basan en el principio de que avanzada la noche, en horarios en que el flujo de usuarios de vías de uso público y de exterior baja considerablemente, no se hace prescindible contar con sistemas de alumbrado diseñados en base al peak diario. La experiencia al utilizar equipos convencionales con balastos de doble nivel de potencia configurados para reducir el consumo en un 40% tras 4 horas desde el encendido, ha demostrado que es posible conseguir niveles de ahorro energético efectivo que bordean un 15%. Para el caso de drivers instalados en artefactos nuevos que utilizan tecnología LED, la reducción puede ejecutarse en más pasos y con escalonamientos menores. Estas reducciones son imperceptibles para el usuario pero generan un efecto directo e inmediato en la reducción de los niveles de contaminación lumínica.

En base a lo anteriormente planteado, la propuesta se basa en establecer que toda luminaria destinada a ser instalada en aplicaciones de exterior, deberá contar con un sistema de reducción de flujo luminoso de al menos dos escalones, reduciendo tras las primeras 4 horas de funcionamiento un 40% de su flujo (funcionamiento al 60% de la capacidad inicial), y tras 6 horas un 60% (funcionamiento al 40% de la capacidad inicial) hasta el amanecer. El gráfico a continuación, resume comparativamente las horas de funcionamiento en un sistema con reducción de flujo escalonado (CRFE), y un sistema sin reducción de flujo (SRF) que opera al 100% durante toda la noche.



Un análisis rápido podría suponer que la implementación de estas acciones permitirían conseguir ahorros aproximados de un 18% en el consumo de energía. El costo de utilizar este tipo de drivers en comparación al uso de drivers sin regulación es menor al 5% y no implica una variable relevante que pudiera suponer una barrera limitante en la implementación de estas medidas mientras que por otro lado genera un impacto similar en la reducción de la contaminación lumínica producida por efecto de la reflexión en el pavimento.

Según análisis efectuados por la OPCC durante el año 2018 en algunas vías de tránsito ubicadas en las principales ciudades del norte del país, se han constatado casos con niveles de iluminación correspondientes a categorías P1 o P2 de la normativa de alumbrado público actual<sup>1</sup>. Sin embargo, los flujos de usuarios efectivos circulando por las calles están muy por debajo de los asociados a dichas categorías. Si bien, estos análisis son puntuales y no necesariamente son representativos de una tendencia que permita asegurar fehacientemente una sobre iluminación, si permiten abrir la discusión respecto de la categorización de las vías de uso público ubicadas en las regiones afectas al campo de aplicación de D.S. N° 043/2012 MMA, en donde a nuestro juicio, podría existir una reclasificación en horarios de avanzada nocturna que permita

<sup>1</sup> La Normativa de alumbrado Público de Chile se basa de manera general en la publicación CIE 115:2010

bajar los niveles exigidos manteniendo estándares normados en base a la normativa vigente.

### C. Nueva zonificación

La normativa actual establece que el rango de aplicación del D.S. N° 043/2012 MMA está circunscrito únicamente a instalaciones ubicadas al interior del perímetro total comprendido por las regiones de Antofagasta (II), Atacama (III) y Coquimbo (IV), esto, principalmente debido a que en estas regiones se dan las mejores condiciones para ejecutar mega proyectos de observación astronómica. Sin embargo, es necesario entender y sociabilizar que el problema no es únicamente materia de competencia astronómica, sino que tiene que ver con un correcto aprovechamiento de la energía que utilizamos para iluminar y el impacto que esto tiene. Por tanto el objetivo de proteger los cielos nocturnos, pasa a ser un medio por el cual se refuerza el objetivo de estado para mejorar la eficiencia energética del país a través de una mejora de los sistemas de alumbrado en Chile.

Esta propuesta extiende el alcance de aplicación a todo el territorio nacional, a través de una clasificación zonal que se basa en la luminosidad ambiental del entorno y las directrices que para estos casos dicta la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) [4]. La asignación de esto deberá estar a cargo de la autoridad a través de estudios detallados en todo el país.

-Zona Clase A: Áreas de alta prioridad con alto valor científico y de investigación para la observación astronómica y áreas silvestres protegidas y sus alrededores que incluyen en su totalidad los límites perimetrales de cualquier comuna que posea parte de su alcance territorial dentro de un radio máximo de 50 kilómetros de alguna de las áreas anteriormente identificadas.

-Zona Clase B: Comprende los límites territoriales administrativos de las Regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, y toda área contigua a zonas Clase A que podrán incluir áreas que el planeamiento urbanístico califique como suelo urbano o urbanizable, y áreas no urbanizables.

-Zona Clase C: Áreas de uso de suelo rural de acuerdo a la Ley General de Urbanismo y Construcciones, o de uso poco intensivo nocturno, así como superficies utilizadas para la siembra, parcelas de agrado y retirados de grandes ciudades, ubicadas en un radio mayor a 50 kilómetros de distancia de las áreas clasificadas como Zona A

-Zona Clase D: Áreas de agrupación protourbana, así como asentamiento informales o formales acogidos a la Ley de Predios Rústicos en zonas sin plan regulador comunal ni plan seccional, de uso nocturno moderado. No podrá clasificarse en

esta categoría cualquier área ubicada a una distancia menor de 50 kilómetros de alguna área clasificada como Zona A

-Zona Clase E: Áreas de suelo urbano de acuerdo a la Ley General de Urbanismo y Construcciones, de uso intensivo nocturno, así como ciudades o pueblos en los que se desarrollen actividades comerciales, industriales, de servicios, y también viales y urbanos. No podrá clasificarse en esta categoría cualquier área ubicada a menos de 100 kilómetros de una zona con clasificación A

### D. Límites de emisión intensidad luminosa y espectral

Esta propuesta define un límite de emisión luminosa para toda fuente de luz utilizada en el alumbrado de exteriores independiente de la zona en que se instale. Este límite es de una intensidad luminosa máxima en las elevaciones gama igual a 90° de cada plano C, que esté comprendida entre 0,00 y 0,49 candelas por cada mil lúmenes de flujo de la luminaria; y de 0 candelas en las elevaciones gama superiores a 90° de cada plano C, por cada mil lúmenes de flujo de la luminaria.

En cuanto a la emisión espectral, se establecen restricciones particulares por cada tipo de zona con el fin de minimizar el impacto sobre todo en áreas de relevancia científica y reservas naturales.

#### -Zonas Clase A:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 1% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 1% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 10% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

#### -Zonas Clase B:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 1% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 7% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 10% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

#### -Zonas Clase C:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 50% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

#### -Zonas Clase D y E:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
  - c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 50% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- E. Limites particulares complementarios para el alumbrado ornamental, decorativo y deportivo/recreacional.

En adición, se propone el control de instalaciones que bajo la actual normativa y producto propio de la naturaleza de su aplicación caen en un vacío, haciendo muy compleja el establecimiento de protocolos de inspección y fiscalización. El alumbrado arquitectónico o decorativo también debe ajustarse al contexto de aplicación, desde el punto de vista del diseño. Esto debe considerarse como parámetros sobre los cuales deben desarrollarse los futuros diseños de iluminación arquitectónica más que como limitaciones que inhiben la creatividad. Así mismo, las instalaciones decorativas de festividades como toda instalación de alumbrado arquitectónico debiesen cumplir las siguientes disposiciones según la clasificación zonal en que se encuentren, con excepción de aquellas fuentes destinadas a la iluminación de actividades temporales tales como conciertos al aire libre o eventos similares.

-Alumbrado arquitectónico:

- a. Zonas Clase A, B y C: La luminancia máxima de superficies iluminadas no deberá superar 5cd/m<sup>2</sup>
- b. Zonas Clase D y E: La luminancia máxima de superficies iluminadas no deberá superar 10cd/m<sup>2</sup>

-Alumbrado decorativo de festividades:

- a. En zonas con clasificación A, B y C, los puntos de luz individuales o en malla utilizados para fines decorativos no podrán exceder en cualquier caso 100lm. Para el caso de luminarias que se especifiquen en forma lineal utilizadas con fines decorativos, no podrá exceder los 500lm por metro lineal.
- b. Todo alumbrado utilizado con fines funcionales (es decir, para proveer de condiciones de iluminación necesarias para la realización de actividades nocturnas), deberán cumplir con las disposiciones de los artículos precedentes.

En lo que respecta al alumbrado deportivo y recreacional, la propuesta se enfoca en recintos destinados para prácticas deportivas a nivel amateur y actividades no federadas, que en la práctica significan instalaciones de alumbrado de exteriores que funcionan continuamente cada noche a diferencia de los eventos deportivos televisados o competiciones federadas que se desarrollan en momentos específicos y por tanto su impacto mantenido es menor. Así, se propone que todo artefacto de iluminación de exteriores utilizados para el alumbrado de actividades deportivas no federadas ubicados en:

-Zonas Clase A, B y C:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 1% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 7% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 10% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

-Zonas Clase D y E:

- a. La radiancia espectral entre 300nm y 379nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- b. La radiancia espectral entre 380nm y 499nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.
- c. La radiancia espectral entre 781nm y 1 micra no podrá superar el 50% de la radiancia espectral entre 380nm y 780nm.

En adición a lo anterior, toda luminaria o proyector utilizados en para estas aplicaciones, tendrá un límite de intensidad máxima de 10 candelas por cada mil lúmenes de flujo de luminaria en las elevaciones gama igual a 90° de cada plano C. Y una distribución de intensidad luminosa de 0 candelas en las elevaciones gama superiores a 90° de cada plano C, por cada mil lúmenes de flujo de la luminaria. Con la finalidad de fomentar el uso de proyectores con fotometría asimétrica con gran alcance.

Así mismo, todo tipo de cañón de luz o proyector láser, que puedan ser orientados libremente mientras se operan, como los utilizados en discotecas o similares, ubicados en:

- a. Zona Clase A: Estarán expresamente prohibidos,
- b. Zonas Clase B, C, D y E: No podrán apuntarse por sobre ángulos gama mayores a 70 grados.

F. Avisos y letreros luminosos e iluminados

Los avisos y letreros luminosos no podrán ser orientados en dirección a zonas residenciales así como casas u edificios ni en ángulos mayores a la perpendicular de la superficie horizontal del suelo donde están instaladas, quedando estas condiciones establecidas en el permiso que para estos efectos entregue la autoridad competente y su límite de emisión estará sujeto a la zona de instalación en base a lo siguiente:

-Zona Clase A: No podrán emitir una luminancia mayor a 25 cd/m<sup>2</sup>

-Zona Clase B: No podrán emitir una luminancia mayor a 50 cd/m<sup>2</sup>

-Zona Clase C: No podrán emitir una luminancia mayor a 400 cd/m<sup>2</sup>

-Zona Clase D: No podrán emitir una luminancia mayor a 800 cd/m<sup>2</sup>

-Zona Clase E: No podrán emitir una luminancia mayor a 1.000 cd/m<sup>2</sup>

En lo relativo a letreros y avisos iluminados, es decir, toda publicidad que utiliza luminarias externas para visualizarla, las fuentes de luz utilizadas deberán cumplir con los límites de emisión luminosa estipulados para todo tipo de alumbrado de exterior y ser iluminado desde arriba hacia abajo.

### 3. Discusión

La ampliación del rango del alcance de la normativa involucra un objetivo muy ambicioso en términos de protección ambiental y eficiencia. Los límites espectrales impuestos van a generar un cambio en la tonalidad de las fuentes de luz utilizadas en el alumbrado de exteriores que en algunos casos podrán generar rechazo en algunos usuarios a quienes en procesos de recambios masivos llevados durante los últimos años (posterior a la masificación de la tecnología LED), presenciaron un radical cambio al pasar de entornos iluminados con tecnologías SAP a un entorno con tonalidades blancas frías (sobre 4.000°K) en base a tecnologías SSL. En consideración a esto, es que se propone, sobre todo en grandes ciudades un proceso de cambio gradual enfocado en nuevos proyectos de recambio, manteniendo los sistemas actuales de iluminación con la exigencia de que los futuros cambios, cualquiera sea el motivo de este, se ejecuten respetando estas nuevas disposiciones.

La correcta especificación de características técnicas en futuros procesos de licitación será muy relevante para el éxito de estas propuestas, por tanto como parte de las acciones de implementación será necesaria la organización de sesiones formativas y/o educativas, así como la elaboración de protocolos o pautas emitidas por la autoridad que guíen a los respectivos encargados de dichos procesos.

Especial cuidado, tiene el aspecto del rendimiento de color de las fuentes utilizadas en aplicaciones de avisos y letreros iluminados sobre todo a las que se instalarán en zonas A o B donde los límites espectrales podrían afectar el rendimiento de color y por tanto la percepción de los letreros y avisos. Frente a esto, lo ideal sería respetar las disposiciones tal como están propuestas, aunque podrían considerarse como excepciones siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones relacionadas con el contexto, cantidad y diseño del aviso, las cuales deberán estudiarse de manera particular por la autoridad competente

### 4. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden el que fueron referidas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la forma deseada de incluirlas.

- [1] Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A., Furgoni, R. (2016). "The new world atlas of artificial night sky brightness". American Association for the Advancement of Science, 2 (6).
- [2] Decreto Supremo N°92 de 1983 de Ministerio de Economía, que aprueba reglamento de instaladores eléctricos y de electricistas de recintos de espectáculos públicos
- [3] Decreto Supremo N°043 de 2012 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece norma de emisión para la contaminación lumínica

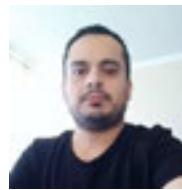
- [4] CIE 150 (2003) - Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations. Commission Internationale de L'éclairage
- [5] CIE 126 (1997) - Guidelines for Minimizing Sky Glow. Commission Internationale de L'éclairage
- [6] Falchi et. Al (2011) Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. Journal of Environmental Management xxx (2011) 1-9

### 5. Biografías



**Pedro Galleguillos**, CEO Laboratorio y Asesorías LAMBDA spa, es investigador y asesor en Luminotecnia. Diseñador Industrial; Magíster en Tecnologías del Diseño; Especialista en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente (MAVILE), y Candidato a Doctor en Luminotecnia, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Desarrolló su carrera

en el ámbito del alumbrado público como diseñador de luminarias y análisis de proyectos de iluminación durante más de 10 años dirigiendo la unidad de I+D de la empresa Aladdin Lighting en Chile. Actualmente a la dirección del laboratorio de fotometría LAMBDA, la medición y/o de niveles luminotécnicos en terreno y asesor en procesos de implementación normativa de iluminación en entes del estado.



**Javier Sayago** es Diseñador de Iluminación egresado de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Se desempeñó en el ámbito público, en la oficina de Alumbrado Público de la Ciudad de San Miguel de Tucumán. Posteriormente se trasladó a Buenos Aires para trabajar en el ámbito privado como proyectista y asesor técnico-comercial. En el 2019 se trasladó a Chile a la Ciudad de La Serena, para trabajar como asesor técnico-lumínico en la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile, en La Serena.



**Pedro Sanhueza**, Director OPCC, secretario Fundación Cielos de Chile, cuenta con estudios de Magistratura en Ciencias Sociales y es Diplomado en Gestión Ambiental. Fue Director Regional de la Comisión Nacional del Medio Ambiente Región de Coquimbo, CONAMA, dependiente del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. En ese cargo le correspondió poner en marcha el Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental regional - SEIA. Participó en la creación y puesta en marcha de la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile - OPCC - convirtiéndose en el director de esta oficina desde el año 2000, cargo que ejerce hasta la fecha. Además es integrante de la Comisión B7 de la Unión Astronómica Internacional -IAU-, integrante del Comité Español de Iluminación -CEI- y participante activo de LUXAMERICA, con presentación de ponencias y artículos ininterrumpidos desde 2006 hasta la fecha. Pedro Sanhueza es responsable del Punto Focal para Latinoamérica de la Iniciativa Starlight y ha ejercido diversos roles en la International Dark-Sky Association, la ONG más grande y de mayor cobertura mundial en el área de la protección del cielo nocturno.



