



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio de la luz artificial durante la noche en la Ciudad de
México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Licenciado en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Joshua Iván Muñoz Salazar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Antonio Solano Lamphar
Consorcio para el Estudio de Zonas Metropolitanas

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2019



per aspera ad astra

Agradecimientos

Añadir agradecimientos a familia (núcleo y Xalapa), amigos (Alan, Memo, Dianita, Beto, Facultad de Ciencias [Jimbo, Emily/David, Repoios, Alex, Mina y Anguiano], CCAmigos y Fabi], profesores (Marco Antonio Miramontes y Fernando García) y programa PAECI, erario México, UNAM, grupo IMM e Ivonne del CCA, CONACyT, la REPSA, Héctor Solano, investigadores de Barcelona (UPC Y UB), a la AGU y a las alcaldías por los datos facilitados de alumbrado público a través del Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México.

Abreviaturas

- CL Contaminación lumínica

Resumen

Las ciudades albergan a la mayoría de las poblaciones humanas a nivel mundial (Zari, 2018). El caso de estudio de esta tesis es el de la Ciudad de México, la cual actualmente concentra cerca de 9 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015) y está inmersa en la Zona Metropolitana del Valle de México, con una población total de alrededor de 22 millones de habitantes (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2015). Esta aglomeración implica serias consecuencias ambientales y hace a la región altamente dependiente de subsidios: con sólo 7 % de la población total de México, en la Ciudad de México se consume casi un tercio del petróleo demandado en el país y 6 % del total de la energía eléctrica (Secretaría de Energía, 2013).

Como consecuencia de una dinámica centralista, en la Ciudad de México se cuenta con alrededor de 600 mil luminarias públicas funcionando en vías primarias y secundarias; por la cantidad y características de tales puntos de luz, se puede hipotetizar que la capital del país actualmente se está enfrentando a otro problema ambiental más: la contaminación lumínica.

La contaminación lumínica es el conjunto de efectos de difusión, en la atmósfera nocturna, de la luz producida por fuentes artificiales que alteran las condiciones originales de luminosidad; estos efectos se producen por la emisión del flujo luminoso en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios, siendo algunos de los más apremiantes la degradación de los socioecosistemas y, más específicamente, afectación a la población humana en temas de uso sustentable de energía, salud y ética (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012), (Stone, 2017).

Este tipo de contaminación comenzó a considerarse un problema ambiental a principios de la década de 1960 (Gil et al., 2012), sin embargo, hasta ahora, no se han realizado estudios referentes al tema en ninguna ciudad del país. Esta tesis es, pues, el primer antecedente de la estimación de los niveles de contaminación lumínica en la Ciudad de México, con el uso del modelo teórico de dispersión de la luz en la atmósfera *SkyGlow* desarrollado por Kocifaj (Kocifaj, 2007).

Aquí se agregarán los resultados encontrados a grandes rasgos.

Productos

Índice general

Agradecimientos	II
Abreviaturas	III
Resumen	IV
Productos	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1. Importancia del ciclo día-noche en la evolución y desarrollo de la vida	1
1.2. Contaminación lumínica: qué es, tipos, orígenes, consecuencias, contexto histórico y ético	2
1.3. Brillo del cielo nocturno	2
1.3.1. Componentes del brillo del cielo nocturno	2
1.3.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de objetos astronómicos	3
1.3.3. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas	3
1.4. Estudio de caso: Ciudad de México	3
1.4.1. Descripción del área de estudio	3
1.4.2. Climatología de nubes y aerosol atmosférico en la Ciudad de México	3
2. Hipótesis y objetivos	4
3. Metodología	5
3.1. Medición de la luz en la atmósfera nocturna	5
3.1.1. Unidades de medición de la luz	5
3.1.2. Métodos de medición de la luz en la atmósfera nocturna	6
3.2. Escala de niveles de contaminación lumínica	6
3.2.1. Normas y leyes en México y el mundo	6
3.3. Alumbrado público	7
3.3.1. Características físicas de diferentes focos	7
3.3.2. Función de emisividad urbana	7
3.4. El modelo <i>SkyGlow</i>	7
4. Resultados y discusión	8
5. Conclusiones	9
6. Recomendaciones	10
Referencias	11

Índice de figuras

1.1. Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)	1
--	---

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción

1.1. Importancia del ciclo día-noche en la evolución y desarrollo de la vida

La duración del ciclo día-noche en la Tierra ha cambiado significativamente a lo largo de la historia geológica debido a la variación de la rotación del planeta. La velocidad de rotación original de los planetas es consecuencia de la conservación del momento angular que poseía la nebulosa interestelar que, al colapsar, dio origen al Sistema Solar hace aproximadamente 4600 Ma (Grea-
ves, 2005). Sin embargo, si la hipótesis del Impacto de Theia es correcta, es factible que la rotación primordial de la Tierra haya sido reconfigurada hace alrededor de 4500 Ma, cuando un cuerpo astronómico del tamaño de Marte, nombrado Theia, colisionó tangencialmente con nuestro planeta dando origen, además, a la Luna (Stevenson, 1987).

La masa lunar es lo suficientemente grande y cercana con respecto a la Tierra para ejercer atracción gravitatoria significativa sobre los océanos, generando así abultamientos de masas de agua (mareas) en ambos extremos del planeta alineados con el eje Tierra-Luna. Sin embargo, la rotación terrestre ocasiona el arrastre de las mareas hacia delante del mencionado eje, lo que implica que una fracción de la atracción gravitatoria Tierra-Luna está desfasada y da origen al torque lunar τ_0 que reduce la velocidad de rotación de la Tierra (Conway, 1982).

Como se muestra en la Figura 1.1, la duración que tuvo el día terrestre posterior a la gran colisión de Theia debió de ser de tan sólo 7 horas aproximadamente gracias a la gran velocidad de rotación y el cambio en la inclinación del eje de rotación que el planeta llegó a experimentar luego del evento (Stevenson and Bartlett, 2016), (Stevenson, 1987); con el paso de los millones de años, tal velocidad fue disminuyendo como consecuencia del torque lunar (Conway, 1982).

El periodo estable de duración del día terrestre de 21 horas que se mantuvo durante gran parte del Precámbrico (Figura 1.1) se explica con la llamada Hipótesis de Estabilización Resonante (Zahnle and Walker, 1987), la cual sostiene que, durante algún tiempo, el anteriormente mencionado torque lunar pudo haber sido cancelado por un torque de signo contrario originado por la resonancia entre las mareas atmosféricas semi-diurnas térmicamente accionadas y las oscilaciones libres de la atmósfera.

La velocidad de rotación actual de la Tierra debió comenzarse a perfilar hace aproximadamente 600 Ma cuando las grandes glaciaciones de ese entonces pudieron haber desestabilizado térmicamente el torque atmosférico, por lo que actualmente, el torque lunar sigue siendo lo suficientemente considerable como para continuar disminuyendo la velocidad del planeta (Stevenson and Bartlett, 2016). Para el final del Criogénico, el ciclo día-noche tomó, finalmente, su configuración actual al mismo tiempo que los niveles de oxígeno y ozono estratosférico fueron óptimos para el surgimiento y desarrollo de vida más compleja (multicelular) en un evento conocido como *la Radiación del Cámbrico*, durante el que se originaron y diversificaron la mayoría de los filos animales incluyendo el de los cordados, al que pertenecemos los humanos .

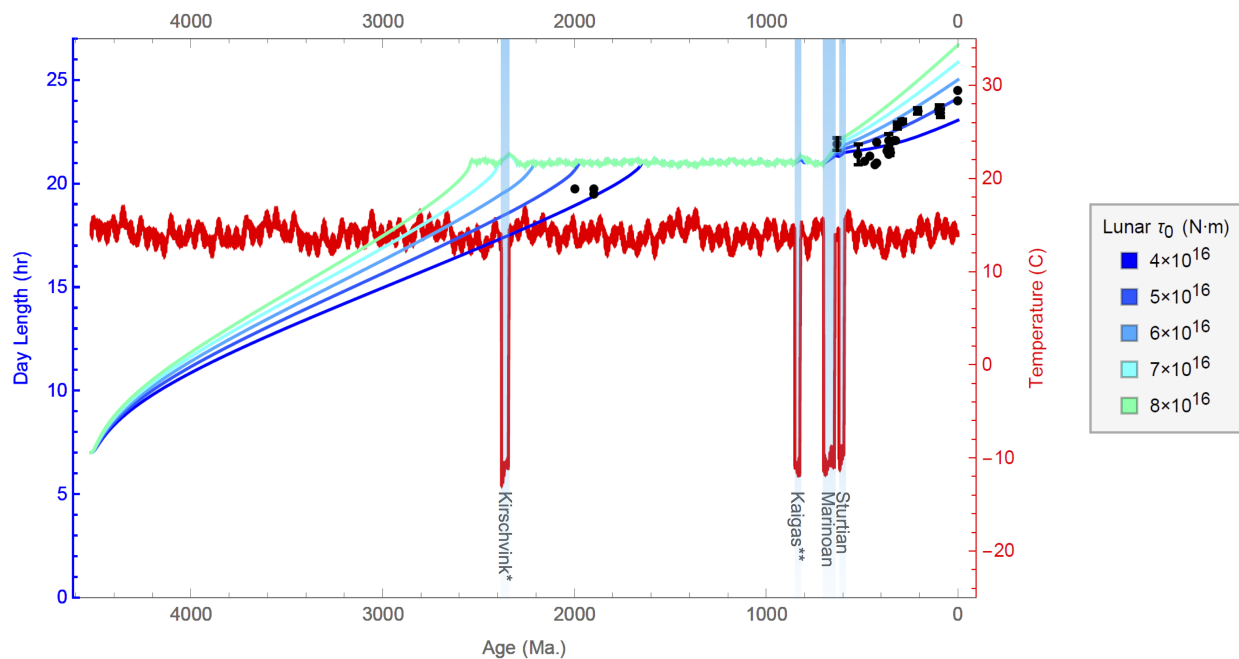


Figura 1.1: Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)

https://en.wikipedia.org/wiki/Cambrian_explosion Poner la gráfica de Holker. Oscuridad, ventaja evolutiva. Más horas de noche, mayor nocturnidad con el paso del tiempo.

1.2. Contaminación lumínica: qué es, tipos, orígenes, consecuencias, contexto histórico y ético

Socioecosistema

1. Socioecosistema IES
2. De ecosistema a socioecosistema diseñado como territorio del capital agroindustria
3. Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica.

Uso y abuso de la energía

En qué región del espectro se ven afectadas diferentes clases de animales de acuerdo con su visión (luminancia).

1.3. Brillo del cielo nocturno

1.3.1. Componentes del brillo del cielo nocturno

De acuerdo con Leinert et al (1998), el brillo total (I_{tot}) del cielo nocturno puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{tot} = (I_A + I_{ZL} + I_{ISL} + I_{DGL} + I_{EBL}) \exp(-\tau) + I_{SCA} \quad (1.1)$$

Donde τ es el coeficiente de extinción que depende de la longitud de onda, el ángulo cenital, la altura sobre el nivel del mar y la composición atmosférica del lugar de la observación.

1.3.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de objetos astronómicos

1.3.3. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas

Propiedades ópticas de las nubes

Propiedades ópticas del aerosol atmosférico

1.4. Estudio de caso: Ciudad de México

1.4.1. Descripción del área de estudio

Incluir REPSA

1.4.2. Climatología de nubes y aerosol atmosférico en la Ciudad de México

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

Objetivos generales

- Reproducir el modelo *SkyGlow* para el caso de la Ciudad de México
- Estimar los niveles de contaminación lumínica en la Ciudad de México
- Generar un antecedente para la campaña de validación del modelo *SkyGlow* en la Ciudad de México

Objetivos particulares

- Caracterizar el alumbrado público de la Ciudad de México
- Elaborar un mapa teórico de contaminación lumínica de la Ciudad de México bajo condiciones de cielo despejado
- Construir mediante simulaciones diferentes escenarios del brillo del cielo nocturno tomando en cuenta diferentes posiciones del observador y condiciones atmosféricas
- Inferir la influencia del aerosol atmosférico y la nubosidad en el brillo del cielo nocturno a partir del objetivo anterior

Capítulo 3

Metodología

Datos de consumo de energía eléctrica por entidad federativa por el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía.

Datos de alumbrado pública por las alcaldías de la Ciudad de México y la Agencia de Gestión Urbana a través del Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México.

3.1. Medición de la luz en la atmósfera nocturna

En *Caracterización de la contaminación lumínica en zonas protegidas y urbanas* (2015), tesis doctoral de Salvador Ribas de la Universidad de Barcelona, se menciona dos tipos de medición del brillo del cielo nocturno:

- Extensivas (a lo largo de un territorio)
- Continuas (emplazamiento permanente a lo largo de una red)

En ambos casos, la finalidad óptima es la elaboración de un mapa de niveles de contaminación lumínica que incluya la dimensión temporal para evaluar los cambios en el brillo del cielo nocturno.

La red de Contaminación Lumínica Catalana es un ejemplo de medición continua de la CL.

3.1.1. Unidades de medición de la luz

Las magnitudes son unidades astronómicas de medición permiten establecer una escala de brillo aparente de objetos celestes. Algunos ejemplos (de menos a más brillantes)son:

- 0.03. Vega, la estrella de referencia
- 6. Estrellas perceptibles a simple vista
- -12.6. Luna llena
- -26.73 Sol

Para la medición del brillo del cielo nocturno se utilizan diferentes unidades según el enfoque del estudio. En el caso de estudios generales (sin dependencia espectral) se retoman las magnitudes astronómicas por unidad de área.

En este sentido las magnitudes/arcosegundo se definen como el brillo medido en magnitudes extendido sobre un arcosegundo cuadrado del cielo (área).

Hay 360 grados en un círculo, hay 60 arcominutos en un grado, hay 21,600 arcominutos en un círculo. Hay 60 arcosegundos en un arcominuto, hay 1,296,000 arcosegundos en un círculo.

Estas unidades de medición son logarítmicas (lo que implica que cambios pequeños en la medición reflejan cambios grandes en el brillo del cielo).

El uso de esta unidad de medición requiere de ciertas consideraciones para la interpretación correcta de los resultados. Como se mencionó con anterioridad, las nubes, el aerosol atmosférico, la niebla y la neblina pueden alterar las mediciones tanto de campo como las remotas.

- Prevenir mediciones oscuras anómalas

La medición de campo más oscura, 22 magnitudes/arcosegundo se ha realizado con el uso de un SQM.

Tal límite superior puede utilizarse para evaluar la confiabilidad de una medición anómalamente oscura que puede ser provocada por efecto de la presencia de árboles/construcciones y/o el deterioro de carcasas de protección de los equipos de medición.

- Prevenir mediciones brillantes anómalas

En las mediciones de campo realizadas con SQM, hay que verificar que en el campo de visión del instrumento (generalmente 22°) no incida directamente la luz proveniente de luminarias o de la Luna.

3.1.2. Métodos de medición de la luz en la atmósfera nocturna

Métodos experimentales

Métodos teóricos

Para la estimación regional de la CL se puede optar por alguno de los métodos arriba descritos o incluso la combinación de ambos.

3.2. Escala de niveles de contaminación lumínica

Los documentos pioneros en la estimación regional de la CL son:

- *CL en la Zona Metropolitana de Barcelona*

En el documento se realiza un análisis de imágenes satelitales (VIIRS, se utiliza el modelo matemático de Cinzano (Atlas Mundial de la CL) y se hace un análisis de las características de los puntos más luminosos (alumbrado público).

Es de interés contrastar la información satelital con mediciones de campo y el análisis del foco contaminante. Las imágenes satelitales sirven para enfocar la problemática.

- *CL en el Parque Natural de Collserola*

Mediciones realizadas con SQM georeferenciadas (Determina la calidad del cielo)

3.2.1. Normas y leyes en México y el mundo

Ley 31/1998 Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias.

Ley 6/2001 Ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno.

Zonificación con 4 categorías y una especial.

- E1. Espacios que por sus características naturales o su valor astronómico especial, sólo se puede admitir un brillo mínimo.
- E2. Áreas incluidas en ámbitos territoriales que sólo admiten un brillo reducido.
- E3. Áreas incluidas en ámbitos territoriales que admiten un brillo medio
- E4. Áreas incluídas en ámbitos territoriales que admiten un brillo alto.
- Puntos de referencia. Puntos cercanos a las áreas de valor astronómico o natural especial incluidos en E1, para los que hay que establecer una regulación específica en función de la distancia a la que se encuentren del área en cuestión.

Según el Departamento de Estudios Luminotécnicos de la ETSEIB (UPC) en *Evaluación del Impacto Ambiental Lumínico en Zonas Protegidas del Área Metropolitana de Barcelona*, los aspectos importantes para controlar la Contaminación Lumínica son:

- Niveles más estrictos a los permisos de las luminarias (Comité Internationale d'Eclairage)
- Límites de luminosidad en el espacio-tiempo (periodo de protección especial a partir de las 23 hrs.)
- Cambiar el uso de luz blanca (especialmente nociva) a una temperatura de color neutra (4200 K), promoviendo las cálidas (inferiores a 3000 K)

El programa Starlight ¿Podría la REPSA convertirse en un lugar protegido?

3.3. Alumbrado público

3.3.1. Características físicas de diferentes focos

3.3.2. Función de emisividad urbana

3.4. El modelo *SkyGlow*

Marco teórico del modelo SkyGlow

<http://www.unisky.sav.sk/?lang=enpage=aplikaciasubpage=glow>

Gráficas tipo all-sky de radiancia en puntos específicos de luz que llega desde todas partes del cielo (180) o en el cenit.

La radiancia espectral es un problema de transferencia radiativa que se puede resolver considerando condiciones de frontera:

Función de emisividad de la ciudad. Relativamente constante en el tiempo. Depende de la cantidad y tipo de luminarias, la geometría (tamaño) de la ciudad y la posición del observador.

Características fluctuantes de la atmósfera. Efecto del aerosol atmosférico o turbidez atmosférica (propiedades ópticas de bulto del aerosol) Contenido de agua líquida de las nubes que es función del tamaño de gotitas de nube y su densidad espacial así como su altitud en la atmósfera.

Correr el modelo sólo para 20 nm y así ahorrar tiempo de computación. Justificar por qué esto es representativo.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Capítulo 5

Conclusiones

Capítulo 6

Recomendaciones

Los resultados de este trabajo van encaminados a la legislación y técnicas de iluminación conociendo qué tipo de fuentes resultan más contaminantes.

Referencias

- Conway, B. A. (1982). On the history of the lunar orbit. *Icarus*, 51(3):610–622.
- Gil, M. G., Páramo, R. S. M., Lamphar, H. S., and Payàs, P. F. (2012). Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial. *Universidad Politècnica de Catalunya*.
- Greaves, J. S. (2005). Disks around stars and the growth of planetary systems. *Science*, 307(5706):68–71.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). Encuesta intercensal.
- Kocifaj, M. (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied Optics*, 46(15):3013–3022.
- Lot, A., Escobedo, M. P., Alarcón, G. G., and Palacios, S. R. (2012). Atlas de riesgos de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. *Coordinación de la Investigación Científica*.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2015). Estudios territoriales de la OCDE. Valle de México, México.
- Secretaría de Energía (2013). Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2013-2027.
- Stevenson, D. J. (1987). Origin of the moon - the collision hypothesis. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 15(1):271–315.
- Stevenson, D. J. and Bartlett, B. C. (2016). Analysis of a Precambrian resonance-stabilized day length. *Geophysical Research Letters*, 43(11):5716–5724.
- Stone, T. (2017). The value of darkness: a moral framework for urban nighttime lighting. *Science and Engineering Ethics*, 24(2018):607–628.
- Zahnle, K. and Walker, J. C. (1987). A constant daylength during the Precambrian era? *Precambrian Research*, 37(2):950–105.
- Zari, M. P. (2018). The importance of urban biodiversity - an ecosystem services approach. *Biodiversity International Journal*, 2(4):357–360.