



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
- **SI** Sistema Internacional de Unidades

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 que tiene 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 (CL).

La CL 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).

Aunque este tipo de contaminación comenzó a considerarse un problema ambiental desde principios de la década de 1960 (Gil et al., 2012), 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

Congresos

Joshua Iván Muñoz Salazar *Efectos de la contaminación lumínica en especies de hábito nocturno.* En Noche de las Estrellas: 3 de diciembre de 2016. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Radiación lumínica en la atmósfera.* En Tercer Simposio de Ciencias de la Tierra: 6 - 8 de noviembre de 2017. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Determinación de propiedades ópticas de nubes con base en su contenido de agua líquida.* En XII Congreso Internacional de Meteorología: 13 - 16 de noviembre de 2018. Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Contaminación lumínica: otra dimensión para la mitigación del calentamiento global.* En 8º Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático: 9 y 10 de octubre de 2018. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Estancias de investigación

Grupo de Estudios Luminotécnicos. Departamento de Ingeniería de Proyectos y Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña: diciembre 2018. Barcelona, España.

Índice general

Agradecimientos	II
Abreviaturas	III
Resumen	IV
Productos	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Fundamentos teóricos de la luz	1
1.1.1. Radiación electromagnética	1
1.1.2. Propiedades ópticas	1
1.1.3. Unidades de medición	1
1.2. Brillo del cielo nocturno	3
1.2.1. Componentes del brillo del cielo nocturno	3
1.2.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de objetos astronómicos	3
1.2.3. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas	3
1.3. Importancia del ciclo día-noche en la evolución de la vida	3
1.4. Contaminación lumínica	5
1.4.1. El enfoque socioecosistémico	5
1.4.2. Contexto histórico del estudio de la CL	5
1.4.3. Tipos de CL	5
1.4.4. Consecuencias de la CL	5
1.4.5. Marco regulatorio: normas y leyes en México y el mundo	5
1.5. Alumbrado público	6
1.5.1. Fuentes de luz	6
1.5.2. Tipos de luminarias	6
1.5.3. Función de emisividad urbana	6
1.6. Estudio de caso: Ciudad de México	6
1.6.1. Descripción del área de estudio	6
1.6.2. Inventario de alumbrado público	6
1.6.3. Consumo de energía eléctrica	6
1.6.4. Climatología de nubes y aerosol atmosférico	6
1.7. Hipótesis	7
1.8. Objetivos	7
1.8.1. Generales	7
1.8.2. Particulares	7

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
2. Metodología	8
2.1. El modelo <i>SkyGlow</i>	8
3. Resultados y discusión	9
4. Conclusiones	10
5. Recomendaciones	11
6. Anexos	12
Referencias	13

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007) .	2
1.2. Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)	4

Índice de tablas

1.1. Propiedades ópticas de la luz	2
1.2. Unidades del SI utilizadas en radiometría	3

Capítulo 1

Introducción

1.1. Fundamentos teóricos de la luz

1.1.1. Radiación electromagnética

La luz es radiación electromagnética que se propaga en forma de onda a través del espacio transportando energía radiante en el proceso. Está constituida por partículas elementales sin masa denominadas fotones. Las propiedades de la luz están condensadas en el espectro electromagnético (Figura 1.1) con base en el número de oscilaciones de la onda por unidad de tiempo (frecuencia, ν) y la distancia lineal entre dos puntos equivalentes de ondas sucesivas (longitud de onda, λ).

Una de tales propiedades de interés para este trabajo en la región visible del espectro electromagnético ($\sim 450\text{-}750\text{ nm}$), es la temperatura de color (T) que está definida a partir de la Ley de desplazamiento de Wien. Esta ley explica la relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro (λ_{max}) y T :

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.1)$$

Donde $b = 2.897... \times 10^{-3}\text{ m K}$, es denominada la constante de Wien. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda radiación electromagnética incidente y que en equilibrio termodinámico y térmico, emite radiación térmica sólo con dependencia en su temperatura.

En la **Sección 1.5.1** se presenta la aplicación del concepto de temperatura de color para la clasificación del color de las fuentes de luz y su implicación biológica en los seres vivos.

1.1.2. Propiedades ópticas

La óptica es el campo de la física que se encarga de estudiar la interacción de la luz con la materia. En la **Tabla 1.1** se resumen las principales propiedades ópticas.

1.1.3. Unidades de medición

Existen dos campos de estudio que se encargan de la medición de la luz: la fotometría y la radiometría. La fotometría se encarga de medir la luz con base en la sensibilidad de la vista humana. Por otro lado, la radiometría mide la luz abarcando todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. Al ser de carácter general este trabajo, en la **Tabla 1.2** se muestran las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) utilizadas en radiometría.

Métodos experimentales y métodos teóricos

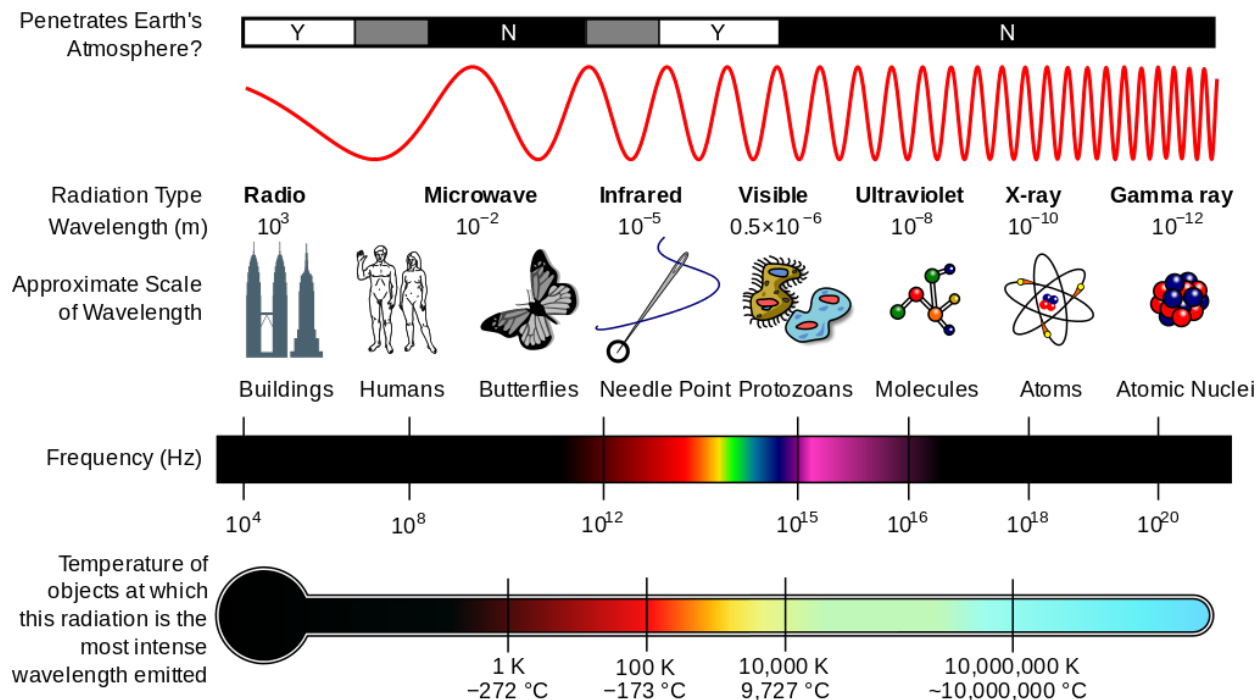


Figura 1.1: Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007)

Tabla 1.1: Propiedades ópticas de la luz

Propiedad	Descripción
Absorción	La luz es captada en el objeto y aumenta su energía térmica
Transmisión	La luz atraviesa el objeto sin cambio de dirección ni intensidad
Dispersión	La luz es captada en el objeto y se re-emite con diferente dirección e intensidad
Rayleigh	Dispersión elástica (conserva energía) en que la longitud de onda de la luz incidente es mucho mayor que el tamaño del objeto
Mie	Dispersión elástica en que la longitud de onda de la luz incidente es similar al tamaño del objeto
Reflexión	La luz se desvía al chocar con el objeto con un ángulo igual al de incidencia
Refracción	La luz cambia de dirección y velocidad al atravesar por un medio diferente

Tabla 1.2: Unidades del SI utilizadas en radiometría

Magnitud física	Unidad del SI	Notas
Energía radiante (Q)	julio (J)	Energía
Flujo radiante (Φ)	vatio	Energía radiada por unidad de tiempo (potencia)
Intensidad radiante (I)	vatio por estereorradián	Potencia por ángulo sólido
Irradiancia (E)	vatio por metro cuadrado	Potencia incidente por superficie
Emitancia radiante (M)	vatio por metro cuadrado	Potencia emitida por superficie de la fuente radiante
Radiancia (L)	vatio por estereorradián por metro cuadrado	Potencia por ángulo sólido y por superficie
Radiancia espectral (L_λ)	vatio por estereorradián por metro cúbico	Potencia por ángulo sólido, por superficie y por longitud de onda

1.2. Brillo del cielo nocturno

1.2.1. 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:

$$I_{tot} = (I_A + I_{ZL} + I_{ISL} + I_{DGL} + I_{EBL}) \exp(-\tau) + I_{SCA} \quad (1.2)$$

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.

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

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

Propiedades ópticas de las nubes

Propiedades ópticas del aerosol atmosférico

1.3. Importancia del ciclo día-noche en la evolución 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 (Greaves, 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).

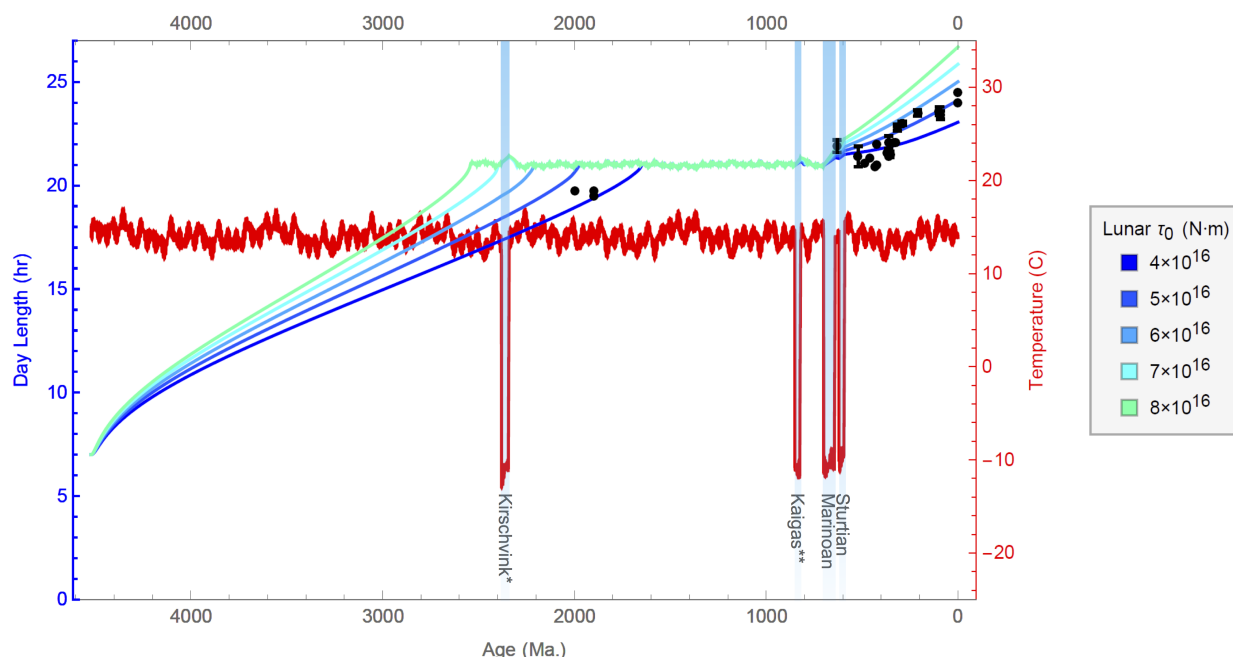


Figura 1.2: Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)

Como se muestra en la Figura 1.2, 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 1.2) 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.

https://en.wikipedia.org/wiki/Cambrian_explosion Poner la gráfica de Holker. Oscuridad, ven-

taja evolutiva. Más horas de noche, mayor nocturnidad con el paso del tiempo.

1.4. Contaminación lumínica

1.4.1. El enfoque socioecosistémico

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

1.4.2. Contexto histórico del estudio de la CL

1.4.3. Tipos de CL

Skyglow de interés

1.4.4. Consecuencias de la CL

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

Podrían estimular la nucleación de partículas ultrafinas que se forman por reacciones fotoquímicas.

1.4.5. Marco regulatorio: 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)

1.5. Alumbrado público

1.5.1. Fuentes de luz

Curso de iluminación de Manuel García.

En la práctica, la temperatura de color sólo tiene significado físico para objetos que son aproximadamente cuerpos negros.

Color temperature Wikipedia.

Lámparas incandescentes (el bulbo se aproxima a un cuerpo negro irradiador).

Lámparas fluorescentes y LEDS no emiten en el espectro de un cuerpo negro, para esto se aplica la correlated color temperature.

1.5.2. Tipos de luminarias

Poste, etc.

1.5.3. Función de emisividad urbana

Teoría de Kocifaj y Héctor

1.6. Estudio de caso: Ciudad de México

1.6.1. Descripción del área de estudio

División política, extensión, situación geográfica,
Incluir REPSA

1.6.2. Inventario de alumbrado público

Incluir número total de luminarias

1.6.3. Consumo de energía eléctrica

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

Su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero

1.6.4. Climatología de nubes y aerosol atmosférico

Artículo de Giovanni Caraballi

1.7. Hipótesis

1.8. Objetivos

1.8.1. 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

1.8.2. 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 2

Metodología

2.1. 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 3

Resultados y discusión

Capítulo 4

Conclusiones

Capítulo 5

Recomendaciones

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

Capítulo 6

Anexos

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 Politécnica de Cataluña*.
- 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*.
- National Aeronautics and Space Administration (2007). Electromagnetic spectrum properties.
- 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.