



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

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

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-atlas], CCAmigos y Fabi], profesores (Marco Antonio Miramontes, Diego Alfaro y Fernando García) y programa PAECI, erario México, UNAM, grupo IMM e Ivonne del CCA, CONACyT, la REPSA, Héctor Solano y Kocifaj, investigadores de Barcelona (UPC Y UB), sinodales honor por la inspiración, 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. Con dedicatoria a ese niño que quería ser veterinario.

Abreviaturas

- **AERONET** *AErosol RObotic NETwork* - Red Robótica de Aerosol
- **AMC** Academia Mexicana de Ciencias
- **ANP** Áreas Naturales Protegidas
- **AOD** *Aerosol Optical Depth* - Espesor Óptico de Aerosol
- **ASY** *Asymmetry Parameter* - Parámetro de Asimetría
- **CEF** *City Emission Function* - Función de Emisión Urbana
- **CL** Contaminación Lumínica
- **CONACyT** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- **EC** Especies Carbonosas: carbón elemental + carbón orgánico
- **EE** Espectro Electromagnético
- **FP** Condiciones de Fondo Promedio
- **GEF** *Garstang Emission Function* - Función de Emisión Urbana de Garstang
- **GEI** Gases de Efecto Invernadero
- **IS** Invierno Seco
- **LED** *Light Emitting Diode* - Diodo Emisor de Luz
- **LGEEPA** Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente
- **MODS** Método de Órdenes de Dispersión Sucesivos
- **OAN** Observatorio Astronómico Nacional
- **PS** Primavera Seca
- **REPSA** Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel
- **SEMARNAT** Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
- **SI** Sistema Internacional de Unidades
- **SQM** *Sky Quality Meter* - Medidor de la Calidad del Cielo
- **SSA** *Single Scatter Albedo* - Albedo de Dispersión Simple
- **TL** Temporada Lluviosa
- **UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México
- **UNESCO** *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* - Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
- **VIIRS** *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* - Conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas y visibles

Resumen

Las ciudades albergan a la mayoría de las poblaciones humanas a nivel mundial (Zari, 2018). El caso de estudio de esta tesis es 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 el área que abarca la Ciudad de México se cuenta con alrededor de 600 mil luminarias públicas funcionando en vías primarias y secundarias (Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México, 2019); por la cantidad, distribución 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 cualquier efecto negativo debido a la emisión de luz artificial en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios. Algunos de los efectos más apremiantes son la degradación de los socioecosistemas y, más específicamente, afectación a la población humana en temas de salud, ética y uso sustentable de energía (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012), (Stone, 2017).

Aunque este tipo de contaminación comenzó a considerarse un problema 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 el primer antecedente de la estimación de los niveles de contaminación lumínica en la Ciudad de México, con el uso del modelo teórico de distribución de la luz en la atmósfera *SkyGlow* desarrollado por Kocifaj (Miroslav Kocifaj, 2007).

Los resultados indican que...

Los principales aportes de este trabajo son la creación del **Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México** y el **Mapa Teórico de Contaminación Lumínica de la Ciudad de México**.

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.

Departamento de Astronomía y Meteorología. Instituto de Ciencias del Cosmos. Universidad de Barcelona.

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	2
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 la Luna	3
1.2.3. Variación natural del brillo artificial del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas	4
1.3. Luz artificial	7
1.3.1. Fundamentos teóricos de las fuentes artificiales de luz	7
1.3.2. Fuentes de luz artificial	8
1.3.3. Tipos de luminarias	9
1.3.4. Función de emisión urbana	9
1.4. Contaminación lumínica (CL)	10
1.4.1. El enfoque socioecosistémico	10
1.4.2. Importancia del ciclo día-noche en la evolución de la vida	10
1.4.3. Breve historia del uso y abuso de la luz artificial	12
1.4.4. Tipos de CL	13
1.4.5. Consecuencias de la CL	13
1.4.6. Estudio de la CL	16
1.4.7. Marco regulatorio: normas y leyes en México y el mundo	17
1.5. Estudio de caso: Ciudad de México	19
1.5.1. Descripción del área de estudio	19
1.5.2. Climatología de aerosol atmosférico y nubosidad	20
1.5.3. Consumo de energía eléctrica	22
1.5.4. Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México	22
1.6. Hipótesis	24
1.7. Objetivos	24
1.7.1. Generales	24
1.7.2. Particulares	24

2. Metodología	25
2.1. El modelo <i>SkyGlow</i>	25
2.1.1. Datos de entrada	25
2.1.2. Bases teóricas del modelo	27
2.1.3. Visualización de datos de salida	29
2.2. El software <i>Radiance Light Trends</i>	30
3. Resultados y discusión	31
3.1. Tendencias de radiancia en las alcaldías de la Ciudad de México	31
3.2. Mapa de radiancia de la Ciudad de México	31
3.3. Gráficas tipo <i>all sky</i> de distribución de radiancia	31
3.4. Experimentos numéricos	31
3.4.1. Cambio del tipo de luminarias en la Ciudad de México	31
3.4.2. Influencia del aerosol atmosférico en la distribución de radiancia	31
3.4.3. Influencia de la nubosidad en la distribución de radiancia	31
4. Conclusiones	32
5. Recomendaciones	33
6. Anexos	34
Referencias	35

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007)	2
1.2. Distribución espectral de A) LED, B) Vapor de mercurio, C) Halogenuros metálicos, D) Sodio a alta presión y E) Sodio a baja presión (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b)	8
1.3. Ángulo de apantallamiento de luminaria (Marin, 2009)	9
1.4. Porcentaje de especies nocturnas de diferentes clases y órdenes de vertebrados con respecto a su origen (Holker et al., 2010)	11
1.5. División política y uso de suelo en la Ciudad de México (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016)	19
1.6. Nubes. A) Altocumulus, B) Altostratus, C) Stratus (Met Office UK, 2019)	21
2.1. Interfaz gráfica del modelo <i>SkyGlow</i>	26
2.2. Geometría del modelo (Miroslav Kocifaj, 2007)	27
2.3. Gráfica polar	29

Índice de tablas

1.1. Propiedades ópticas de la luz (Born and Wolf, 2003)	1
1.2. Unidades del SI utilizadas en radiometría (Meyer, 1968)	2
1.3. Componentes del brillo del cielo nocturno (Leinert et al., 1998)	3
1.4. Principales fuentes de luz artificial	8
1.5. Climatología de aerosol atmosférico en la Ciudad de México (Carabali et al., 2017)	20
1.6. Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México	23
2.1. Fracción q radiada directamente hacia arriba en el ángulo cenital z' (Miroslav Kocifaj, 2007)	28

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 (Purcell and Morin, 2013). Las propiedades de la luz están condensadas en el espectro electromagnético (EE) (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 las propiedades de la luz de interés para este trabajo en la región visible del EE ($\sim 350\text{-}800\text{ nm}$) es la temperatura de color (T) que está definida a partir de la Ley de desplazamiento de Wien (Halliday et al., 2008). 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 $b = 2.897\ldots \times 10^{-3}\text{ m K}$, es denominada la constante de Wien. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe y emite toda radiación electromagnética; en equilibrio termodinámico y térmico, emite radiación térmica sólo con dependencia en su temperatura.

En la **Sección 1.3** y en la **Sección 1.4** 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 humanos.

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.

Tabla 1.1: Propiedades ópticas de la luz (Born and Wolf, 2003)

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

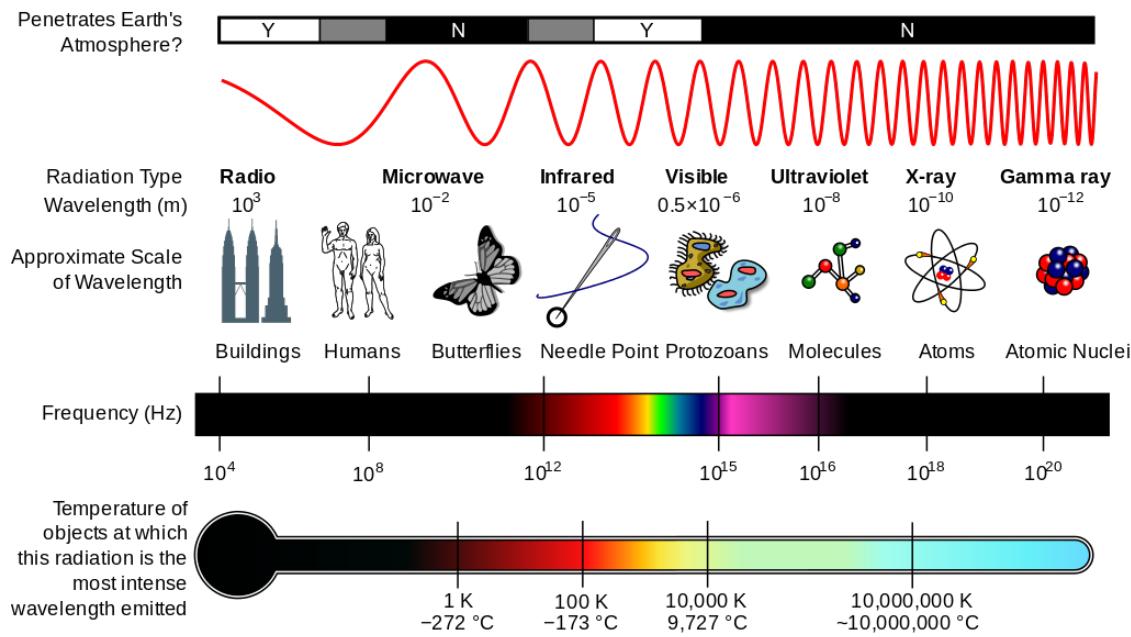


Figura 1.1: Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007)

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 EE. 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.

Para estudios enfocados en los niveles de luminosidad en ecosistemas y su influencia en cada uno de sus componentes con base en su sensibilidad, es fundamental utilizar medidas fotométricas (véase el **Capítulo 5**).

Tabla 1.2: Unidades del SI utilizadas en radiometría (Meyer, 1968)

Magnitud física	Unidad del SI	Notas
Energía radiante (Q)	J	Energía
Flujo radiante (Φ)	W	Energía radiada por unidad de tiempo (potencia)
Intensidad radiante (I)	$W \text{ sr}^{-1}$	Potencia por ángulo sólido
Irradiancia (E)	$W \text{ m}^{-2}$	Potencia incidente por superficie
Emitancia radiante (M)	$W \text{ m}^{-2}$	Potencia emitida por superficie de la fuente radiante
Radiancia (L)	$W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$	Potencia por ángulo sólido y por superficie
Radiancia espectral (L_λ)	$W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-3}$	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

En la **Tabla 1.3** se describen los principales componentes del brillo total del cielo nocturno sin Luna (I_{tot}) tal como Leinert et al. (1998) lo reportan para el rango del ultravioleta lejano (~ 100 nm) al infrarrojo lejano ($\sim 200 \mu\text{m}$).

Tabla 1.3: Componentes del brillo del cielo nocturno (Leinert et al., 1998)

Componente	Descripción
Brillo del aire (I_A)	Excitación de átomos de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera superior por su interacción con la radiación solar
Luz zodiacal (I_{ZL})	Dispersión de la radiación solar en partículas de polvo interestelar
Luz estelar (I_{ISL})	La luz de las estrellas en su conjunto
Luz difusa galáctica (I_{DGL})	Luz emitida y dispersada por partículas de polvo de la galaxia
Luz de fondo extragaláctica (I_{EBL})	Luz producida por galaxias o cúmulo de galaxias
Luz artificial (I_{SCA})	Luz artificial dispersada en la tropósfera

La suma de tales componentes (excepto luz artificial, netamente de origen antropogénico) se considera de origen natural y es susceptible de ser atenuada por acción de la atenuación atmosférica. De acuerdo con esta clasificación, el brillo total del cielo nocturno puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

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

Donde τ es el coeficiente de atenuación atmosférica que depende de la longitud de onda, la distancia cenital (la distancia angular del cuerpo celeste con respecto al cenit), la altura sobre el nivel del mar del observador y las condiciones atmosféricas.

La definición matemática del brillo total del cielo nocturno nos permite inferir que las principales contribuciones se deben al brillo del aire y a la luz zodiacal; estimaciones experimentales confirman este comportamiento reportando mediciones de radiancia de hasta $10^{-4} \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ atribuibles al brillo del aire (Leinert et al., 1998).

1.2.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de la Luna

La luz lunar percibida en la Tierra es resultado de la reflexión de la luz solar y, en menor medida, terrestre en la superficie de la Luna. El albedo lunar es 0.136 lo que significa que refleja 13.6 % del total de la radiación incidente (Matthews, 2008). La cantidad de luz lunar varía hasta en tres órdenes de magnitud a lo largo del mes de acuerdo con el ciclo lunar (Kyba et al., 2017).

En condiciones atmosféricas despejadas y de nula luz artificial, la luz lunar es la principal responsable del brillo total del cielo nocturno ya que, típicamente, los valores de brillo del aire son hasta tres órdenes de magnitud más pequeños que los reportados para la luz lunar (Hanel et al., 2018).

Es importante tomar en cuenta la advertencia de Kyba et al. (2017) quienes reportan que en la literatura científica existen datos erróneos de luz lunar y hacen visible la necesidad de una publicación que reporte valores típicos de referencia de luz lunar a través de estudios de largo plazo (al menos de un año) en localidades sin influencia de luz artificial.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, para efectos de este estudio centrado en la luz artificial, se procede a despreciar los términos de luz de origen natural en la ecuación de brillo total del cielo nocturno sin Luna, reduciéndose entonces a:

$$I_{tot} = I_{SCA} \quad (1.3)$$

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

Propiedades ópticas del aerosol atmosférico

La concentración de aerosol atmosférico depende principalmente de emisiones naturales y antrópicas, patrones de circulación sinóptica, meteorología local y características topográficas (Carabali et al., 2017).

Garstang (1991) describió por primera vez la dispersión de la luz artificial por acción del aerosol atmosférico. Posteriormente Miroslav Kocifaj (2007) verifica que el aerosol atmosférico puede amplificar o reducir el brillo del cielo nocturno con base en las propiedades ópticas de bulto descritas a continuación.

Espesor óptico de aerosol (AOD)

El AOD es una cantidad adimensional que representa la atenuación atmosférica de la luz por el aerosol atmosférico integrada verticalmente en toda la columna atmosférica. La diferencia de potencial (V) medida por un fotómetro solar es proporcional a la radiancia espectral (L_λ) que es captada por el instrumento en la superficie (Holben et al., 1998). El espesor óptico total (τ_{TOT}) puede calcularse a partir de la siguiente ecuación conocida como la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) d^2 e^{-\tau_{TOT} m} \quad (1.4)$$

Donde V es la diferencia potencial medida en una longitud de onda dada λ , d es la tasa entre el promedio y la distancia real Tierra-Sol y m es la masa óptica de aire. La masa óptica de aire es la tasa entre la masa de aire que la luz solar atraviesa hasta la superficie de la Tierra y la masa de aire que atravesaría si la incidencia fuera vertical.

Otros constituyentes atmosféricos pueden dispersar la luz y, por lo tanto, deben de considerarse en el cálculo del AOD (Holben et al., 1998) tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau(\lambda)_{Aerosol} = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_{agua} - \tau(\lambda)_{Rayleigh} - \tau(\lambda)_{O_3} - \tau(\lambda)_{NO_2} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \tau(\lambda)_{CH_4} \quad (1.5)$$

Parámetro de Angstrom

La distribución por tamaño del aerosol atmosférico puede ser estimada a través del Parámetro de Angstrom (α) (Holben et al., 1998) definido a partir de la siguiente ecuación:

$$\alpha(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{-\ln\left(\frac{\tau_{\lambda 2}}{\tau_{\lambda 1}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)} \quad (1.6)$$

Donde $\tau_{\lambda 1}$ y $\tau_{\lambda 2}$ son el AOD en las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente. Típicamente los valores de α varían entre -2 y 2. $\alpha > 1$, indica que el modo fino de aerosol atmosférico es dominante mientras que $\alpha < 1$ indica que el modo grueso es el más abundante (Carabali et al., 2017).

Parámetro de Asimetría (ASY)

Su valor es una medida de la dirección de la dispersión de la luz. Está definido como el promedio del coseno del ángulo de dispersión θ ponderado por intensidad de la luz:

$$ASY = \langle \cos\theta \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\pi \sin(\theta) \cos(\theta) P(\theta) d\theta \quad (1.7)$$

Con $P(\theta)$ la función de fase de dispersión que describe la dispersión de la luz dependiente del ángulo:

$$P(\theta) = \frac{4\pi}{\sigma_{SCA}} \frac{d\sigma_{SCA}}{d\theta} \quad (1.8)$$

Donde σ_{SCA} es la sección transversal de dispersión:

$$\sigma_{SCA} = \frac{\pi D^2}{4} Q_{SCA} \quad (1.9)$$

Con D el diámetro de la partícula y Q_{SCA} la eficiencia de dispersión (cuánta energía absorbida es dispersada).

Cuando $ASY = 1$, toda la luz es dispersada hacia adelante; $ASY = 0$, indica una dispersión isotrópica (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

Albedo de Dispersión Simple (SSA)

Este parámetro relaciona los coeficientes de dispersión (ϵ_{SCA}) y absorción (ϵ_{ABS}) (Foot and Leeson, 1987) como muestra la ecuación:

$$SSA = \frac{\epsilon_{SCA}}{\epsilon_{SCA} + \epsilon_{ABS}} \quad (1.10)$$

Los coeficientes de dispersión ϵ se obtienen:

$$\epsilon = N\sigma \quad (1.11)$$

Con N la concentración de partículas de tamaño D . El valor del SSA es representativo de las propiedades de absorción de la luz del aerosol atmosférico. Cuando el valor del SSA es cercano a 1 es un indicativo que el aerosol en cuestión refleja más luz, mientras que, para el aerosol más absorbente, el valor del SSA es cercano a 0.

Propiedades ópticas de las nubes

Twomey (1967) desarrolló por primera vez una teoría de dispersión de la luz debido a la nubosidad. Estudios más recientes (Miroslav Kocifaj, 2007), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2014), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015), han encontrado cambios significativos en el brillo del cielo por la dispersión de luz artificial por acción de la nubosidad. Las nubes son un medio dispersivo complejo, esto es, que poseen diferentes constituyentes con diferente índice refractivo complejo (\underline{n}) definido como:

$$\underline{n} = n + ik \quad (1.12)$$

Donde n , la parte real de la ecuación, indica la velocidad de la luz dentro de un medio y la parte imaginaria k es el coeficiente de atenuación de la luz dentro del medio en cuestión (Born and Wolf, 2003). Los valores de la parte imaginaria del índice refractivo complejo para las gotitas de nube y los cristales de hielo que forman las nubes son muy bajos de acuerdo con HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015).

Tomando en cuenta lo anterior, HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015) consideran a las nubes como cuerpos Lambertianos con albedo espectral variante para su estudio óptico. Un cuerpo Lambertiano es aquel que posee una superficie ideal que refleja la luz incidente de manera isotrópica, permitiendo así que el brillo de tal superficie sea la misma para el observador independientemente de su ángulo de visión (Born and Wolf, 2003).

El albedo espectral de las nubes depende principalmente de factores como la altitud de su base con respecto al observador y la microfísica incluyendo el contenido de agua líquida y la distribución por tamaño de las gotitas de nube (Miroslav Kocifaj, 2007).

Resulta complicado medir el albedo espectral de las nubes durante la noche ya que la mayoría de los fotómetros que miden esta propiedad funcionan con base en niveles de radiación presentes sólo durante el día. Por esta razón, las simulaciones numéricas de la influencia de las nubes en el brillo del cielo nocturna resultan útiles (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

Además, es importante mencionar que los factores que se toman en cuenta en la modelación teórica son capaces de reproducir diferentes comportamientos del brillo del cielo con respecto a la posición del observador, lo cual es deseable para la predicción del brillo del cielo nocturno influenciado por diferentes tipos de nubes (Miroslav Kocifaj, 2007), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

1.3. Luz artificial

En esta sección se aborda la caracterización de la luz artificial (de origen netamente antropogénico). Para esta tesis se considera que el alumbrado público es el principal responsable del brillo del cielo nocturno ocasionado por luz artificial (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b).

1.3.1. Fundamentos teóricos de las fuentes artificiales de luz

El diseño de iluminación es una disciplina fundamental para la correcta iluminación en el alumbrado público, la cual requiere de colaboraciones con otros campos como la física, biología, ciencias de la Tierra, ingeniería y arquitectura. El reto es grande ya que una correcta iluminación debe ser sustentable, apropiada para su contexto y debe lograr ahorro económico (Gil et al., 2012), (Schulte et al., 2018). A continuación se presentan los conceptos físicos fundamentales detrás de la iluminación.

Producción de luz

Para la producción artificial de luz se necesita de una serie de transformaciones de energía. El primer paso es la generación de energía eléctrica. De acuerdo con Ramos and Montenegro (2012), la mayoría de la energía eléctrica consumida en México es generada a partir de la transformación de energía química por medio de la combustión de hidrocarburos.

Una vez generada la energía eléctrica, necesita ser transformada en energía radiante. Esto se logra por medio del mecanismo interno de la fuente de luz. Los mecanismos más utilizados son la termoradiación (radiación de un cuerpo caliente) y luminiscencia (radiación de cuerpo no caliente) (Gil et al., 2012). En la **Subsección 1.3.2** se abordan las particularidades de cada uno de estos mecanismos.

Distribución espectral

La cantidad de energía radiada en determinadas regiones del EE (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013a). En la **Subsección 1.3.2** se muestran los gráficos de distribución espectral para diferentes tipos de fuentes de luz artificial.

Temperatura de color

La temperatura de color define el color de una fuente de luz sólo si esta se asemeja a un cuerpo negro. La mayoría de las fuentes de luz tradicionalmente utilizadas (incandescentes) se asemejan a un cuerpo negro, mientras que para las que no cumplen con esa característica (de descarga y LED), se implementa la temperatura de color correlacionada (Gil et al., 2012).

Para efectos de evaluación de reproducción de color y confort se asocia una apariencia de color a los rangos de temperatura de color teniendo «luz cálida» para temperatura de color de hasta 3000 K, «luz intermedia» de 3000 - 5300 K y «luz fría» para temperaturas de color mayor a 5300 K (Schulte et al., 2018).

Eficiencia

Definida para estudios fotométricos, se trata de la cantidad de flujo luminoso (visible) emitido por una fuente de luz por unidad de potencia consumida. La unidad del flujo luminoso es el lumen (lm), el equivalente fotométrico del flujo radiante. No es posible obtener una eficiencia de 100 % debido a las pérdidas ocasionadas por disipación calorífica y radiaciones no visibles para el humano (Gil et al., 2012).

1.3.2. Fuentes de luz artificial

Existen tres principales tipos de fuentes de luz artificial: incandescente, de descarga y diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) (**Tabla 1.4**), (Figura 1.2) (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b), (Elvidge et al., 2010), (Gil et al., 2012).

La iluminación incandescente es la más antigua y la más utilizada para interiores, su funcionamiento se basa en hacer pasar corriente eléctrica a través de un filamento, aumentando su temperatura hasta hacer que emita radiaciones visibles (termorradiación).

Por otro lado, la luz de descarga, utilizada ampliamente para alumbrado público, es generada por la excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos (luminiscencia).

Por último, el LED, que recientemente se ha comenzando a implementar en el alumbrado público, genera luz moviendo electrones de un semi-conductor sólido de un estado de alto nivel de energía a uno más bajo a través de la aplicación de una diferencia de potencial (electroluminiscencia).

Tabla 1.4: Principales fuentes de luz artificial

Tipo	Fuente de luz	Temperatura de color (K)	Eficiencia (lm W ⁻¹)
Incandescente	Lámpara incandescente	2700	8 - 18 (baja)
De descarga	Lámpara de sodio a baja presión (LPS)	2000	180 (muy alta)
	Lámpara de sodio a alta presión (HPS)	2300	100 (alta)
	Lámpara de halogenuros metálicos (MH)	2800 - 5000	70 - 90 (alta)
	Lámpara de vapor de mercurio (MV)	3200 - 4000	60 (media)
LED	LED	2700 - 5000	10 - 150 (baja)

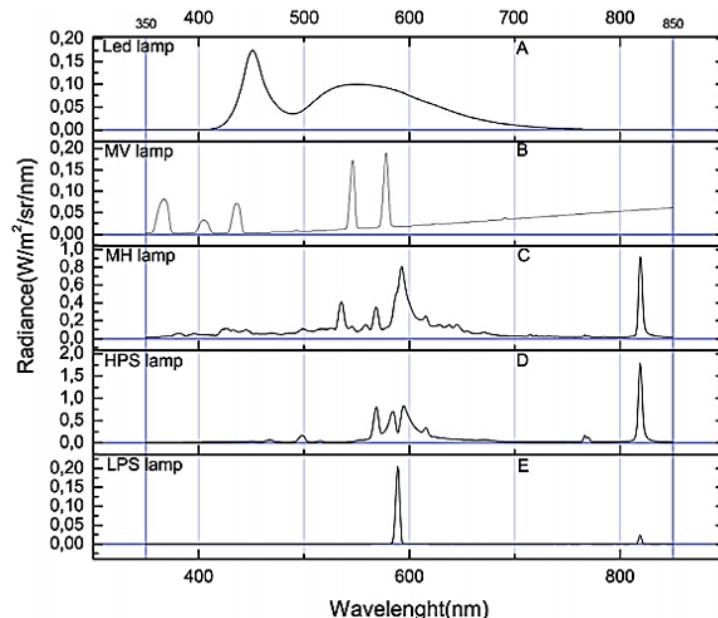


Figura 1.2: Distribución espectral de A) LED, B) Vapor de mercurio, C) Halogenuros metálicos, D) Sodio a alta presión y E) Sodio a baja presión (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b)

1.3.3. Tipos de luminarias

Las luminarias son dispositivos que alojan y protegen la fuente de luz y reconducen su luz hacia donde se quiere iluminar (Gil et al., 2012). Para el caso del alumbrado público existen dos tipos: luminarias para vías principales (autopistas, carreteras) y luminarias para vías secundarias (callejones) (Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México, 2019).

La forma en que la luminaria distribuye en el espacio la luz emitida por la fuente es fundamental en el efecto sobre el brillo del cielo nocturno. Marin (2009) propone el ángulo entre la línea vertical de la fuente de luz y la línea máxima a la que ilumina (ángulo de apantallamiento) para garantizar un buen aprovechamiento de la luz y evitar que se desperdicie escapando hacia la atmósfera. El ángulo de apantallamiento ideal es por debajo de los 75°(A); para ángulos mayores a ese (B - E) existe afectación en diferente proporción al brillo del cielo nocturno (Figura 1.3).

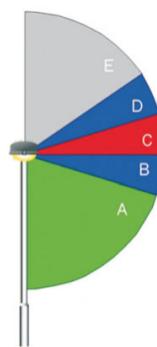


Figura 1.3: Ángulo de apantallamiento de luminaria (Marin, 2009)

1.3.4. Función de emisión urbana

Las fuentes de luz artificiales (públicas y privadas) emiten luz en casi todas las direcciones (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014), (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2016). Por lo tanto, la luz artificial emitida a la atmósfera se debe a la superposición de emisiones de las diferentes fuentes distribuidas en la superficie.

La distribución angular de la luz emitida por una ciudad es fundamental para la modelación del brillo del cielo nocturno ocasionado por luz artificial (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014) esta distribución es caracterizada a través de una función de emisión parametrizada denominada Función de Emisión Urbana (CEF, por sus siglas en inglés) la cual depende de las características del sistema de iluminación de una ciudad (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014).

Debido a la falta, hasta la actualidad, de inventarios detallados de las fuentes de luz (públicas y privadas) y su naturaleza heterogénea, resulta extremadamente complicado obtener la CEF a través de estudios teóricos o experimentales (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014). Gars-tang (1986) desarrolló una aproximación semi-empírica para la estimación de la CEF, la cual es discutida en el **Capítulo 2**

1.4. Contaminación lumínica (CL)

La CL es cualquier efecto negativo debido a la emisión de luz artificial en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012), (Stone, 2017).

En esta sección se presentan los argumentos que permiten afirmar que el brillo del cielo nocturno ocasionado por la luz artificial, es una fuente de CL en los socioecosistemas. Entiéndase contaminación como la alteración negativa de un sistema a través de la introducción de elementos físicos extraños (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012).

Entiéndase un sistema como un conjunto de componentes interactuando en los que: 1) el comportamiento de cada componente tiene un efecto en el comportamiento del todo y, 2) el comportamiento de los componentes y sus efectos en el todo son interdependientes (Ávila and Perevochtchikova, 2019).

1.4.1. El enfoque socioecosistémico

Los seres humanos nombramos a la realidad natural de distintas maneras, las cuales poseen significados brutalmente diferentes de acuerdo con el fundamento filosófico con el que percibimos el planeta (Ávila and Perevochtchikova, 2019), (Uribe, 2014). Por ejemplo, las empresas extractivas denominan «recursos naturales» a tal realidad, los habitantes de una región, «territorio» y los científicos, «ecosistema».

Con la aparición de la vida en la Tierra, surgieron los ecosistemas como un nivel de organización de la materia y la energía, en que los sistemas físico-químicos (abióticos) y los sistemas bióticos intercambiaron y evolucionaron de manera integrada. Sin embargo, con la emergencia de las sociedades y su organización con base en un lenguaje simbólico, nacen los socioecosistemas (Ávila and Perevochtchikova, 2019), (Uribe, 2014), (Urquiza and Cadenas, 2015).

Un socioecosistema es, por lo tanto, un sistema complejo (no lineal) y adaptativo que hace referencia a los procesos de acoplamiento e interacción entre los sistemas sociales (cultura, economía, organización social y política) y los ecosistemas (Urquiza and Cadenas, 2015).

Resulta fundamental, entonces, estudiar las problemáticas de contaminación ambiental desde el enfoque socioecosistémico. De esta manera se hace visible que, separar el nicho humano de la realidad natural, es el principal motor de la actual crisis ambiental. En este sentido, las Ciencias de la Tierra surgen como la disciplina integradora que, a través de la generación de conocimiento con un enfoque socioecosistémico, logra sembrar directrices en la construcción de la sustentabilidad.

1.4.2. 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 velocidad de 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 (JS. 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 (DJ. Stevenson, 1987).

La velocidad de rotación actual de la Tierra debió comenzarse a perfilar hacia finales del periodo Criogénico (hace alrededor de 600 Ma), 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 (Conway, 2000).

La mayoría de los organismos, incluyendo a los humanos, poseen ritmos circadianos que son controlados por el ciclo día-noche. Tales ritmos juegan un papel primordial en la regulación del metabolismo, el crecimiento y el comportamiento (JC. Dunlap, 1999). Los fotoreceptores circadianos han estado presentes en la retina de los vertebrados desde hace aproximadamente 500 Ma, una vez que la duración del día se estableció en 24 horas (Conway, 2000), (Rich and Longcore, 2006).

Se ha encontrado que la proporción de especies vertebradas nocturnas que surgieron durante radiaciones evolutivas recientes es mayor con respecto a las antiguas (Figura 1.4). Esto sugiere que la nocturnalidad es un importante paso en la evolución de los vertebrados (Holker et al., 2010). Sin embargo, no sólo la nocturnalidad es importante en los vertebrados, se estima que más del 60 % de invertebrados son nocturnos (Rich and Longcore, 2006).

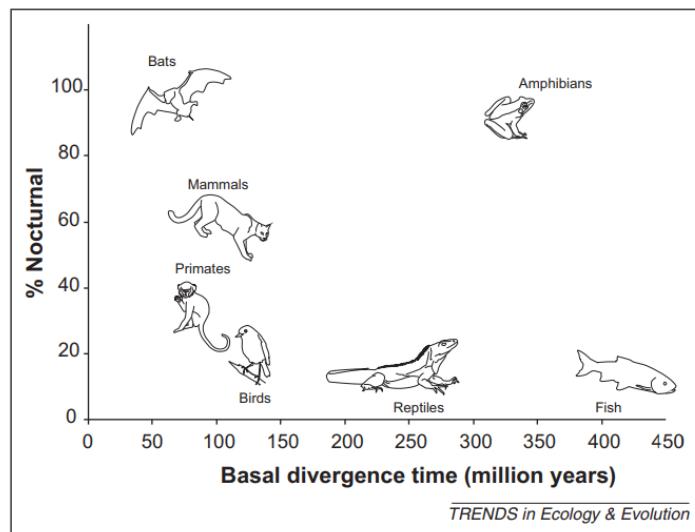


Figura 1.4: Porcentaje de especies nocturnas de diferentes clases y órdenes de vertebrados con respecto a su origen (Holker et al., 2010)

Se teoriza que dada la alta permeabilidad de la piel de los anfibios y por ende, la susceptibilidad a las características de los nichos diurnos como la radiación solar, estos tuvieron que adoptar la nocturnalidad tempranamente (Holker et al., 2010).

1.4.3. Breve historia del uso y abuso de la luz artificial

Es sabido que el control regular del fuego por nuestros antepasados, desde hace aproximadamente 400 ka (Dunbar and Groult, 2014), fue fundamental en la evolución humana: la capacidad de cocinar alimentos mejoró la digestión y aprovechamiento de calorías, generando así el aumento de la masa cerebral; las llamas del fuego proveieron protección de los predadores, permitiendo a los primeros humanos extender sus nichos ecológicos (Wrangham and Carmody, 2010).

Por otro lado, la luz artificial del fuego extendió por primera vez la duración del día para las primeras sociedades. Las actividades nocturnas estuvieron lejos de ser económicamente productivas (exclusivamente diurnas); tales horas extras se dedicaron al canto, el baile, las ceremonias religiosas y a contar historias, lo que provocó una alteración en los ritmos circadianos de los primeros humanos (Wiesnner, 2014).

Mientras que la observación de la Luna y las estrellas despertó el sentido de vulnerabilidad y preguntas sobre el origen del universo, las historias nocturnas crearon un espacio y contexto propicio para desarrollar órdenes más complejos de la conciencia de sí mismo, el entendimiento de los pensamientos y sentimientos de los otros, y la generación, regulación y transmisión de instituciones culturales (Wiesnner, 2014).

Un esquema similar al de las primeras sociedades se siguió en los grupos humanos antiguos: los griegos, egipcios y chinos utilizaron lámparas de aceite en contextos religiosos a principios de la era común. Hasta antes de la Revolución Industrial (mediados del siglo XVIII) se utilizaron velas de cera y sebo con fines no económicos: como fuente de calor y fragancia e incluso para la cuenta del tiempo (Duvall, 1988).

Con la llegada de la Revolución Industrial como antecedente del capitalismo, los valores en torno a la luz artificial cambiaron radicalmente: la luz eléctrica se hizo necesaria para la iluminación de las jornadas nocturnas y el regreso a casa de los trabajadores. Se comenzaron a extender las horas productivas tradicionalmente restringidas durante el día para aumentar la producción (Hudson, 1992). Es fácil seguir esta tendencia hasta nuestros días al revisar las estadísticas que muestran que la mayor parte de energía eléctrica es utilizada para la industria y alumbrado público/privado (Ramos and Montenegro, 2012).

En conclusión, la lógica capitalista bajo la que vivimos ha transformado las horas nocturnas dedicadas antiguamente al descanso y a la realización de actividades espirituales y culturales en tiempo económicamente productivo gracias a la luz artificial producida e implementada en gran escala la cual, aún peor, está muy lejos de ser sustentable (véase **Subsección 1.4.5** y **Subsección 1.5.3**).

1.4.4. Tipos de CL

Hasta este punto únicamente se ha mencionado el brillo del cielo nocturno (objeto de este estudio) como un tipo de CL, sin embargo existen otros tipos (Gil et al., 2012) los cuales es importante mencionar y se abordan a continuación.

Emisión directa

Es la emisión procedente directamente de la fuente de luz hacia el entorno originalmente oscuro. Es la causa más crítica de contaminación, debido a la intensidad de la fuente.

Luz reflejada

La luz es reflejada en el suelo o construcciones en direcciones no deseadas.

De acuerdo con el Nuevo Atlas Mundial del Brillo Artificial del Cielo Nocturno (Falchi et al., 2016) aproximadamente 80 % de la población mundial vive bajo algún tipo de CL, siendo el brillo del cielo nocturno el tipo más extendido.

En conclusión, la energía radiante del alumbrado público y privado es la causa de la CL y mientras esté funcionando durante la noche, la CL será inevitable. Sin embargo sus consecuencias pueden ser reducidas considerablemente, eliminando la emisión directa y regulando la luz reflejada y el brillo del cielo nocturno.

1.4.5. Consecuencias de la CL

Regularmente al alumbrado público y privado se les denota de una manera positiva asignándoles valores asociados con la seguridad, estética e identidad los cuales, desafortunadamente, al ser abordados de manera no sustentable invisibilizan el «lado oscuro de la luz» que se aborda en la presente subsección (Schulte et al., 2018), (Gil et al., 2012).

Las consecuencias de la CL son extremadamente diversas y afectan en diferentes escalas a los socioecosistemas. Sin embargo, basta con remitirse a la definición de CL para entender, a grandes rasgos las relaciones causa-consecuencia. Esto es, la luz artificial se vuelve contaminante cuando es emitida en intensidades, direcciones, rangos espectrales, horarios innecesarios o en cualquier combinación de estas características (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012), (Stone, 2017).

A continuación se mencionan algunas de las consecuencias de la CL clasificadas de acuerdo con su afectación en los socioecosistemas (de manera directa e indirecta). Este recuento no pretende ser exhaustivo pero sí ser representativo de las consecuencias más apremiantes y cuyo estudio es todavía emergente.

Consecuencias directas

Hasta este punto únicamente se ha mencionado la temperatura de color como indicador de confort en los humanos. Sin embargo, esta propiedad al ser cualitativa no es suficiente para evaluar el impacto de la CL en diferentes especies. Para tales fines resulta necesario basarse en el espectro de emisión de las fuentes de luz (Comité Español de Iluminación, 2017).

Como todas las fuentes de luz de amplio espectro, los LEDs producen una porción de su radiación en longitudes de onda cortas (véase la Figura 1.2). Debido a que las radiaciones con longitud de onda corta se dispersan con mayor facilidad en la atmósfera terrestre que las de longitud de onda larga y que, además, se ha encontrado marcada sensibilidad biológica a las longitudes de onda corta, se ha planteado que los LEDs son una de las fuentes de luz con mayor potencial en términos de CL (Solano et al., 2017).

Sin embargo, también es necesario mencionar que los efectos adversos que puedan generar las radiaciones tanto de longitud de onda corta, como de longitud de onda larga, dependen de otros factores tales como la intensidad y el tiempo de exposición (Schulte et al., 2018). Dentro de las consecuencias directas de la CL en diferentes tipos de seres vivos se cuentan las siguientes:

Insectos

Los insectos son los principales invertebrados afectados por la CL ya que su actividad es básicamente nocturna. Utilizan la luz del firmamento como referencia de navegación y sus sistemas visuales están adaptados a niveles muy bajos de luz. Los efectos de la CL en los insectos principalmente son la captación (muerte por impacto o agotamiento al ser atraídos a las fuentes de luz artificial), pérdida de visión, desorientación en la navegación y alteración de conductas reproductivas (la luz puede suprimir la emisión de feromonas o dificultar la actividad de atracción) (Comité Español de Iluminación, 2017), (Davies et al., 2013).

Anfibios

Como se comentó con anterioridad, los anfibios son los vertebrados más afectados por la CL. Su tegumento (tejido orgánico que cubre su cuerpo) es altamente glandular, carece de protección contra la radiación ultravioleta, y es sensible a la luz y al calor. La CL también tiene efecto sobre su reproducción (la luz inhibe los llamados de atracción), retrasos en el crecimiento y variación en el comportamiento de caza (migración de especies a lugares iluminados donde hay mayor densidad de insectos, lo cual los hace más vulnerables a las condiciones del entorno) (Rich and Longcore, 2006), (Gil et al., 2012), (Gil et al., 2012).

Aves

La CL afecta especialmente la migración de las aves: las luces de edificios iluminados desorientan la navegación y dificultan la ocultación de predadores (Rich and Longcore, 2006).

Mamíferos

La mayor afectación de la CL en los mamíferos es en la alteración de los ritmos circadianos, que como se mencionó con anterioridad, su funcionamiento está totalmente supeditado al ciclo día-noche y son fundamentales en la regulación del metabolismo, el crecimiento y el comportamiento.

En este punto resulta importante mencionar los efectos en la salud humana debido a la CL. La alteración en los ritmos circadianos humanos se asocia con la supresión de la producción de la hormonas que sólo se producen durante total oscuridad como la melatonina. Se ha reportado que el déficit de melatonina y la disruptión circadiana en general, están asociadas con un gran

número de patologías entre otras el aumento de la incidencia del síndrome metabólico, enfermedades cardiovasculares, alteraciones cognitivas y afectivas, riesgo de padecimiento de algunos tipos de cáncer y envejecimiento prematuro (Comité Español de Iluminación, 2017), (Gil et al., 2012).

Debido a los orígenes multifactoriales de las patologías anteriormente descritas, hasta el momento, no es posible asociar directamente la CL como causante de tales. Sin embargo, las patologías oculares como las retinopatías sí pueden deberse en gran medida la exposición a luz intensa y luz con longitudes de onda cortas (Comité Español de Iluminación, 2017).

Consecuencias indirectas

En este tipo de consecuencias se hace aún más evidente la falta de sustentabilidad en la iluminación artificial de las ciudades. Además de afectar directamente la salud de los componentes biológicos de los socioecosistemas, la CL compromete la continuidad de los sistemas físicos (base de los componentes biológicos y sociales de los socioecosistemas). Las principales afectaciones en este sentido son la pérdida de los cielos oscuros, el derroche energético (y por consiguiente económico), sinergia con el cambio climático y la contaminación atmósfera.

Pérdida de los cielos oscuros

La pérdida de los cielos oscuros debido a la CL no sólo afecta a la astronomía; valores éticos y espirituales que generalmente son minimizados en el estudio de la CL están siendo comprometidos. Stone (2017) aborda estos valores a través de su categorización en «conexión con la naturaleza», «visibilidad de las estrellas», «patrimonio y tradición» y «maravilla y belleza».

Derroche energético

El derroche energético que se genera a raíz de la CL tiene implicación en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, por lo tanto, en el calentamiento global. Tal implicación es tan alta que, de acuerdo con T. Gallaway and R. Olsen and D. Mitchell (2010), si se eliminara toda la luz artificial desperdiciada en Estados Unidos ocurriría un efecto equivalente en las emisiones de CO₂ que si removieran 9.5 millones de automóviles de circulación. Desde esta perspectiva, el proteger los cielos oscuros es también una manera de exigir un uso sustentable de la energía y mitigar el cambio climático.

Contaminación atmosférica

Un aspecto interesante es el que sugiere que la luz artificial durante la noche podría producir un efecto sinérgico en la contaminación atmosférica al funcionar como un potencial estímulo de nucleación de partículas ultrafinas (peligrosas para el sistema respiratorio) y contaminantes como el ozono que, entre otros factores, se forman a partir de reacciones fotoquímicas (Gil et al., 2012).

1.4.6. Estudio de la CL

La necesidad de cuantificar continuamente la CL ha propiciado el desarrollo de herramientas experimentales (instrumentos de medición) y teóricas (modelos) (Miroslav Kocifaj and Thomas Posch and HA. Solano, 2015). Sin embargo, la mayoría de los instrumentos que miden el brillo del cielo nocturno suelen tener limitaciones que dificultan la obtención e interpretación de los datos.

El instrumento más utilizado para medir el brillo del cielo nocturno es el Sky Quality Meter (SQM), este equipo únicamente es capaz de hacer mediciones puntuales en el cenit, lo cual no es representativo de la distribución angular de la radiancia en el cielo (Ribas, 2015). Por otro lado, los instrumentos de interés (incluido el SQM) están diseñados para medir en regiones específicas del EE, lo que implica una pérdida de información valiosa (Ribas, 2015).

Ademas de compensar las deficiencias presentes en los instrumentos de medición, los modelos han resultado adecuados para la construcción de simulaciones significativamente estadísticas de distribución de luz en el cielo nocturno las cuales poseen fundamentos teóricos robustos con significado físico (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

Los primeros intentos de desarrollar una ley de propagación de la luz en el cielo nocturno surgieron después de que la CL comenzó a significar un problema para la comunidad astronómica. En este sentido Bertiau et al. (1973) presentaron un modelo simplificado que estimaba el brillo artificial cenital a través de la función población - brillo $F(D)$ y la función brillo - distancia $Q(D)$ de las ciudades aledañas (Linares et al., 2018).

Un paso importante hacia un modelo más completo lo dio Garstang (1986) quien en lugar de considerar las ciudades como fuentes puntuales, las modeló como superficies circulares uniformes (Linares et al., 2018) y, como se menciona en la **Sección 1.2** y en la **Sección 1.3**, la cantidad de aerosol atmosférico es un parámetro ajustable e incluye la reflectancia del suelo y el porcentaje de luz emitida hacia la atmósfera a través de la Función de Emisión Urbana.

Hoy en día existen dos modelos prominentes: *SkyGlow* (Miroslav Kocifaj, 2007) e *ILLUMINA* (Aubé et al., 2005). Ambos modelos consideran la distribución heterogénea de las fuentes de luz. *SkyGlow* sólo toma en cuenta dispersión de primer orden, lo que lo hace adecuado para observadores cercanos a las fuentes de luz mientras que *ILLUMINA* incluye dispersión de primer y segundo orden, lo que permite experimentos en cualquier dirección y distancia (lo que requiere mayor tiempo computacional con respecto a *SkyGlow*) (Linares et al., 2018). Por esta razón *SkyGlow* es recomendable para experimentos que incluyen una malla con gran número de puntos (dominio geográfico grande con alta resolución espacial) (Linares et al., 2018).

Dadas las características antes mencionadas, para la exploración de la luz artificial durante la noche en la Ciudad de México (objetivo principal de este trabajo) el uso del modelo *SkyGlow* es óptimo. En el **Capítulo 5** se propone la manera en que una campaña de validación del modelo podría llevarse a cabo utilizando instrumentos como el SQM, cámaras digitales calibradas, datos satelitales y datos generados por ciudadanos no pertenecientes a instituciones de investigación (ciencia ciudadana).

1.4.7. Marco regulatorio: normas y leyes en México y el mundo

Para efectos de legislación de la CL es importante conocer primero la magnitud de la CL para poder reducirla al mínimo en cada proyecto de iluminación. Posteriormente tendría que diseñarse el marco regulatorio con base en las características específicas de la CL en la región encontradas durante el estudio. La estructura principal de cualquier norma o ley sobre CL tendría que incluir los parámetros que se presentan a continuación (Gil et al., 2012).

Zonificación. Las diferentes zonas se clasifican en función de su sensibilidad respecto a la CL. Esta zonificación permitiría determinar límites posteriores para minimizar el efecto de la CL sin afectar las actividades que se realicen en la zona en cuestión. El grado de mayor protección es para las zonas E1 y el de menor grado, para las zonas E4:

- E1. Zonas más restrictivas, de máxima protección frente a la CL. Corresponden a áreas de interés natural (áreas naturales protegidas).
- E2. Corresponden a suelo no urbanizable fuera de un área de interés natural (zonas de amortiguamiento).
- E3. Áreas que el planeamiento urbanístico califica como suelo urbano o urbanizable. Zonas residenciales en que las vías de tráfico y las aceras están iluminadas.
- E4. Áreas en suelo urbano de uso intensivo en actividades nocturnas: vías comerciales, industriales y de servicios.

Fuentes de luz. La elección de fuentes de luz para un proyecto de iluminación debe tener en cuenta la eficiencia energética pero, aún más importante, la influencia de la distribución espectral en la CL (véase Subsección 1.4.5).

Luminarias. Véase Subsección 1.3.3.

Niveles lumínicos. A partir de este punto, se establecen criterios más o menos restrictivos para limitar los niveles de iluminación de acuerdo con las características de la zonificación.

Régimen de funcionamiento. Debe limitarse el horario de funcionamiento de las instalaciones de iluminación.

España, Estados Unidos y Chile son países pioneros en el establecimiento de legislaciones con respecto a la CL. Sin embargo, el objetivo de tales iniciativas es la protección de los cielos nocturnos para la observación astronómica dejando de lado la protección a los socioecosistemas (Gil et al., 2012).

Para el caso de México, la historia no es distinta. Originalmente el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) se establece en 1878 en el Castillo de Chapultepec, Ciudad de México; sin embargo, dado el aumento de la CL en la ciudad que impide realizar observaciones astronómicas de calidad, el OAN se muda en 1971 a la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California bajo la tutela del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (UNESCO and CONACyT and AMC, 2016).

Dado el crecimiento de las ciudades aledañas con su correspondiente CL, fue necesaria la elaboración de legislaciones para la protección del cielo nocturno del OAN (UNESCO and CONACyT and AMC, 2016). De tal manera, en 2006 se aprueba un reglamento contra la CL en el municipio de Ensenada, en 2011 en el municipio de Mexicali y en 2018 en el municipio de Tijuana. En 2010 Baja California publica un decreto que incluye la prevención y control de la CL en la Ley Estatal de Protección al Ambiente y en 2016 la CL es contemplada en la Ley Estatal de Desarrollo Urbano (UNESCO and CONACyT and AMC, 2016).

Sin embargo, el camino hacia la regulación de la CL a nivel federal parece ir en buenos términos. Apenas en febrero de 2018 fue aprobada una reforma en materia de CL a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) propuesta por la diputada Tania Arguijo quien a su vez fue asesorada por científicos preocupados por la CL como el Dr. Fernando Ávila del Instituto de Astronomía de Ensenada de la UNAM (Arguijo, 2018), (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 2018).

Los puntos clave de tal propuesta se encuentran en el Artículo 111 en el que se proponen facultades a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para:

XV. Expedir, en coordinación con la Secretaría de Energía, las normas oficiales mexicanas que establezcan y certifiquen los niveles máximos permisibles de la luz artificial en el medio ambiente, incluido el impacto de la luz intrusa, que causen CL, y

XVI. Promover y apoyar técnicamente, en coordinación con la Secretaría de Energía, a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas para prevenir, reducir y controlar la CL, que tengan por objeto el cumplimiento de la normatividad aplicable.

El decreto de esta reforma entrará al vigor al día siguiente al de su publicación en el Diario Oficial de la Federación y la SEMARNAT dentro de los 6 meses siguientes a la entrada en vigor del decreto deberá expedir la norma oficial mexicana que sea necesaria para dar cumplimiento a las disposiciones reformadas. Sin embargo, a más de un año de su aprobación, la reforma aún no es decretada.

Como antes se mencionó, la CL tiene efecto en diferentes escalas de los socioecosistemas por lo que, en este punto se propone que además de considerarse en la LGEEPA (la cual se encarga de regular lo relativo al derecho ambiental especificado en la Constitución Política), tendría que incluirse en la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano.

Los resultados de esta tesis van encaminados a la legislación de la CL a nivel Ciudad de México, aportando una estimación de los niveles de CL e información sobre qué tipo de fuentes de luz resultan más contaminantes (véase **Capítulo 4** y **Capítulo 5**).

1.5. Estudio de caso: Ciudad de México

1.5.1. Descripción del área de estudio

La Ciudad de México es la capital de México, abarca una superficie de 1458 km² (0.08 % de la superficie del país) (Tabla 1.6) a una altura media de 2250 m s. n. m. Se sitúa enmarcada en el denominado Valle de México conformado por la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al oeste, la Sierra de Ajusco-Chichinauhzin al sur y la Sierra Nevada al este. El Valle de México es uno de los cuatro valles que integran la Cuenca de México (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2015).

La Ciudad de México es una de las ciudades más pobladas del mundo. Actualmente concentra cerca de 9 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015) (Tabla 1.6) 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).

La división política de la ciudad consta de 16 alcaldías (Tabla 1.6). De manera general, la mancha urbana se concentra en la fracción centro-sur de la ciudad, mientras que 872 km² (59 % de la superficie de la ciudad) distribuidos en su mayoría al sur, son considerados suelo de conservación. En la ciudad existen 23 Áreas Naturales Protegidas (ANP) que ocupan lo correspondiente a 29 % de la superficie del suelo de conservación (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016) (Figura 1.5, las zonas en blanco indican suelo urbano).

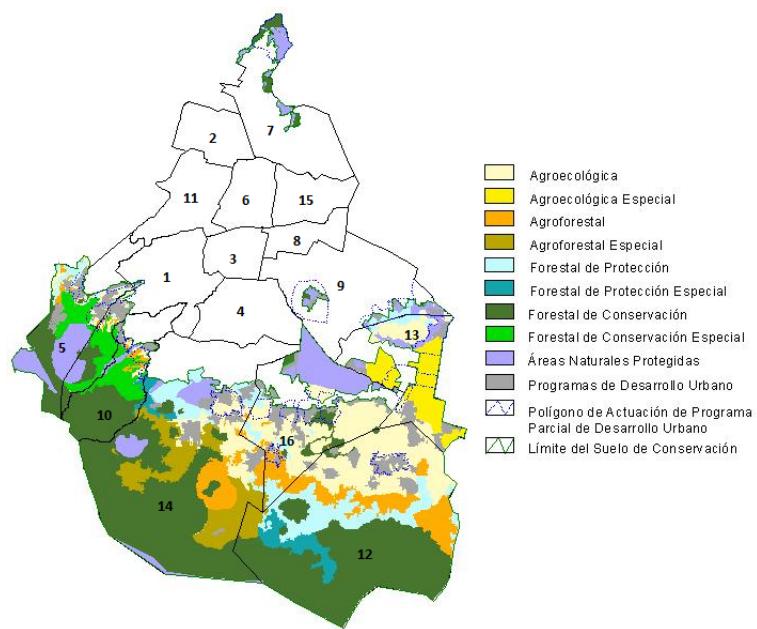


Figura 1.5: División política y uso de suelo en la Ciudad de México (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016)

El área de estudio contemplada en esta tesis se divide en 17 polígonos correspondientes a las 16 alcaldías de la Ciudad de México y el contorno de Ciudad Universitaria (campus principal de la UNAM) ubicada en la alcaldía Coyoacán, la cual es de especial interés debido a que alberga la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA).

La REPSA es una reserva natural de carácter urbano (no incluida en la categoría de suelo de conservación) protegida por la UNAM, lo cual garantiza un conocimiento ejemplar a través de las numerosas instituciones dedicadas a la investigación y divulgación científica. Su sustrato está conformado en su mayoría por roca basáltica la cual posee un alto valor biológico, ecológico y geomorfológico ya que permite recargar los mantos acuíferos, mantiene la humedad y la calidad del aire, y contribuye a amortiguar los cambios de temperatura en el microclima. La vegetación es de matorral xerófilo con marcada estacionalidad. Actualmente cuenta con una extensión de 237.33 hectáreas, que comprenden tres zonas núcleo y 13 zonas de amortiguamiento (Página Oficial de la REPSA, 2019).

En el Atlas de Riesgos de la REPSA (Lot et al., 2012) se cita la CL como una de las amenazas para los componentes biológicos del socioecosistema albergado por la REPSA y se menciona la necesidad de estudios en este sentido para la protección y conservación de la vida silvestre de Ciudad Universitaria.

La Ciudad de México está localizada en una zona sub-tropical donde las estaciones del año pueden ser separadas en tres períodos: Primavera Seca (PS) de abril a mayo, Temporada Lluviosa (TL) de junio a octubre e Invierno Seco (IS) de noviembre a marzo (Jáuregui, 2002).

1.5.2. Climatología de aerosol atmosférico y nubosidad

Para los fines de modelación de esta tesis resulta importante contar con la climatología de aerosol atmosférico y nubosidad en la Ciudad de México, como una referencia que permite realizar experimentos numéricos con condiciones cercanas a las reales.

Aerosol atmosférico

Carabali et al. (2017) realizaron la climatología de aerosol atmosférico para la Ciudad de México a partir de los datos obtenidos de 1999 a 2014 de la red AErosol RObotic NETwork (AERONET) para los períodos IS, PS y TL (Tabla 1.5).

El AOD medido a 500 nm (AOD_{500}) provee una más robusta caracterización del AOD ya que a esa longitud de onda la absorción de vapor de agua y oxígeno es mínima (Kanniah et al., 2009). Por otro lado, el Parámetro de Angstrom calculado en el intervalo espectral 440-870 ($\alpha_{440-870}$) es el más adecuado para discriminar el tamaño de las partículas de aerosol atmosférico (Kaskaoutis et al., 2007).

Tabla 1.5: Climatología de aerosol atmosférico en la Ciudad de México (Carabali et al., 2017)

Período	AOD_{500}	$\alpha_{440-870}$
Invierno Seco (IS)	0.29	1.54
Primavera Seca (PS)	0.33	1.49
Temporada Lluviosa (TL)	0.37	1.39

Nubosidad

Aunque hasta la fecha no existe una climatología como tal de la nubosidad en la Ciudad de México, es posible inferir el tipo típico de nubes que se forman en cada uno de los períodos del año. Las nubes de interés para los experimentos numéricos de esta tesis son las nubes bajas y medias dada su cercanía con las fuentes artificiales de luz (Figura 1.6).

A continuación se abordan las características de las nubes que forman parte del inventario del modelo *SkyGlow* utilizado en este trabajo (World Meteorological Organization, 1987), (HA. Solaño and Miroslav Kocifaj, 2015).

Altocumulus

- Clasificación por altitud: nube media (3-5km)
- Formación: Generalmente a través de la condensación por ascenso de masas de aire húmedas
- Albedo espectral: 0.36 (350-800 nm)

Altostratus

- Clasificación por altitud: nube media (3-5km)
- Formación: Asociadas a frentes (fríos, cálidos y ocluidos)
- Albedo espectral: 0.5 (350-800 nm)

Stratus

- Clasificación por altitud: nube baja (700 m para este estudio)
- Formación: Condensación de masas de aire cálidas y húmedas en niveles bajos
- Albedo espectral: 0.5 (350-800 nm)

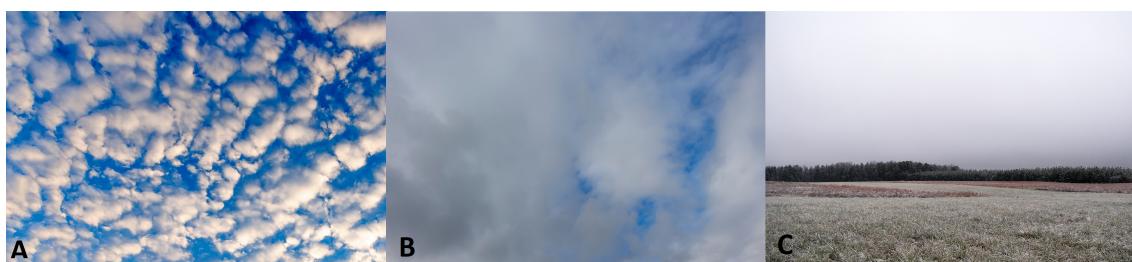


Figura 1.6: Nubes. A) Altocumulus, B) Altostratus, C) Stratus (Met Office UK, 2019)

1.5.3. Consumo de energía eléctrica

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). Las estadísticas muestran que del 100 % de energía eléctrica consumida en México, 30 % corresponde al sector residencial y de servicios públicos, sólo debajo del 52 % correspondiente a la industria (Ramos and Montenegro, 2012).

De acuerdo con el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía, durante 2017 se consumieron en la Ciudad de México un total de $12,575,591 \text{ MW h}^{-1}$ de los cuales $2,938,559 \text{ MW h}^{-1}$ corresponden al sector residencial (23 %) de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (Tabla 1.6).

Es de interés conocer la relación entre el consumo de energía eléctrica y el cambio climático, lo cual es posible estimar a través de la emisión de Gases de Efecto Invernadero, más específicamente de CO₂ con el uso de la siguiente relación (Unidad de Transparencia de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018):

$$E_{CO_2} = W_{Elect} FE_{Elect} \quad (1.13)$$

Donde E_{CO_2} es la emisión en toneladas de CO₂ equivalente debida al consumo de energía eléctrica, W_{Elect} es el consumo de energía eléctrica en MW h⁻¹ y FE_{Elect} es el factor de consumo de energía eléctrica en toneladas de CO₂ equivalente por MW h⁻¹.

El factor de consumo de energía eléctrica se basa en el consumo total de combustible y la generación de electricidad neta entregada a la red. Varía cada año de acuerdo con la mezcla de combustibles empleados en la generación de electricidad distribuida por el Sistema Eléctrico Nacional, el cual está integrado por la Comisión Federal de Electricidad y productores independientes (Programa GEI México, 2013).

Considerando que el factor de consumo de energía eléctrica en 2017 fue 0.582 toneladas de CO₂ equivalente por MW h⁻¹ (Comisión Reguladora de Energía, 2017), se tiene que en 2017 se emitieron 7,318,993 toneladas de CO₂ por consumo de energía eléctrica en la Ciudad de México (6 % del total de las emisiones nacionales de CO₂ por consumo de energía eléctrica).

1.5.4. Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México

Gracias a los datos brindados por las oficinas de transparencia de cada una de 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 se construyó el **Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México** (Tabla 1.6).

Los datos de consumo de energía eléctrica por entidad federativa se obtuvieron a través del Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía (sie.energia.gob.mx) y los datos de consumo de energía eléctrica por municipio producidos por la Comisión Federal de Electricidad se obtuvieron a través de la Plataforma Datos Abiertos del Gobierno de México (datos.gob.mx).

Tabla 1.6: Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México

#	Alcaldía	Extensión (km ²)	Población (número de habitantes)	Halogenuros metálicos (%)	LED (%)	Vapor de sodio de alta presión (%)	Número de luminarias (vías primarias)	Número de luminarias (vías secundarias)	Número de luminarias (totales)	Consumo de energía eléctrica sector residencial (MW h ⁻¹)
1	Alvaro Obregón	96.17	749,982	62		38	9,911	71,397	40,835	210,903
2	Azcapotzalco	33.6	400,161	100			5,009	22,527	27,536	168,877
3	Benito Juárez	26.63	417,416	93		7	8,862	27,550	36,412	234,458
4	Coyoacán	54.12	608,479	100			6,463	36,856	43,319	230,390
5	Cuajimalpa de Morelos	80.95	199,224	90		10	1,147	13,186	14,333	72,127
6	Cuauhtémoc	32.44	532,553	100			12,574	26,338	39,512	286,460
7	Gustavo A. Madero	94.07	1,164,477	99		1	13,778	46,362	60,140	415,940
8	Iztacalco	23.3	390,348	100			6,056	23,050	29,106	145,105
9	Iztapalapa	116.1	1,827,868	100			12,700	91,148	103,848	530,447
10	Magdalena Contreras	63.61	243,886	95		5	999	9,200	10,199	44,762
11	Miguel Hidalgo	46.99	364,439	95		5	10,920	30,938	41,758	185,013
12	Milpa Alta	228.4	137,927	100			268	10,226	10,494	20,645
13	TLÁHUAC	83.45	361,593	97		3	2,030	18,389	20,419	90,984
14	Tlalpan	312	677,104	100			5,313	3,321	8,634	21,367
15	Venustiano Carranza	33.42	427,263	100			9,970	28,481	38,451	175,050
16	Xochimilco	122	415,933	95		5	1,488	22,359	23,947	106,031
Total			107,488				589,416	2,938,559		

1.6. Hipótesis

La cantidad, distribución y características de luz artificial producida por el alumbrado público da origen al brillo del cielo nocturno, que en mayor o menor medida, genera contaminación lumínica en las alcaldías de la Ciudad de México.

De manera general se considera que existe contaminación lumínica cuando los valores de radiancia son mayores al máximo valor natural registrado, es decir $10^{-4} \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (véase Subsección 1.2.1).

1.7. Objetivos

1.7.1. Generales

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

1.7.2. Particulares

- Elaborar el **Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México**
- Generar el **Mapa Teórico de Contaminación Lumínica de la Ciudad de México** con salidas del modelo *SkyGlow*
- Comparar mediciones satelitales de radiancia contra los valores teóricos obtenidos con el modelo *SkyGlow*
- Construir mediante experimentos numéricos con el modelo *SkyGlow* 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 de la Ciudad de México a partir del objetivo anterior

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se describen las bases teóricas y técnicas del modelo de distribución de la luz en la atmósfera *SkyGlow* desarrollado por Miroslav Kocifaj (2007), además del software *Radiance Light Trends* desarrollado por Stare and Kyba (2019) que permite analizar datos de radiancia medidos por el sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo del satélite *Suomi National Polar-orbiting Partnership*.

Advertencia: la distribución de radiancia teórica generada por el modelo *SkyGlow* se construye considerando un observador en superficie por lo que, al comparar los valores de radiancia teóricos del modelo con los generados por el VIIRS, no se pretende validar el modelo, sino estimar la tendencia de los valores de radiancia para el área de interés.

En el **Capítulo 5** se presentan propuestas para validar el modelo *SkyGlow* para la Ciudad de México.

2.1. El modelo *SkyGlow*

SkyGlow es un modelo teórico escalable que permite simular el comportamiento angular de la radiancia en el cielo durante la noche en una región específica o integrada del EE. No considera restricciones en el número de fuentes de luz ni en la distribución espacial de las mismas en la vecindad del punto de medición, por lo que la distancia y el ángulo acimutal de las fuentes de luz son configurables. El modelo es aplicable para fuentes de luz con dimensiones finitas reales con propiedades radiativas espectrales y angulares definidas (Miroslav Kocifaj, 2007).

La influencia de la atmósfera en la modulación de la radiación es formulada en términos de propiedades ópticas de las moléculas de aire y aerosol atmosférico. La reflectancia espectral y la altitud de las capas de nubes son los principales factores tomados en cuenta para la modelación de condiciones de nubosidad (Miroslav Kocifaj, 2007), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2014).

Las ecuaciones derivadas son traducidas en código numéricamente rápido, lo que es deseable para la realización de experimentos numéricos que incluyen una malla con gran número de puntos (dominio geográfico grande con alta resolución espacial) (Miroslav Kocifaj, 2007), (Linares et al., 2018).

2.1.1. Datos de entrada

Definición del dominio

El área de la superficie de estudio (forma y tamaño) es definida a través de vértices coordenados (latitud y longitud). *Para este estudio:* polígonos de cada una de las 16 alcaldías de la Ciudad de México y de la REPSA (Figura 2.1).

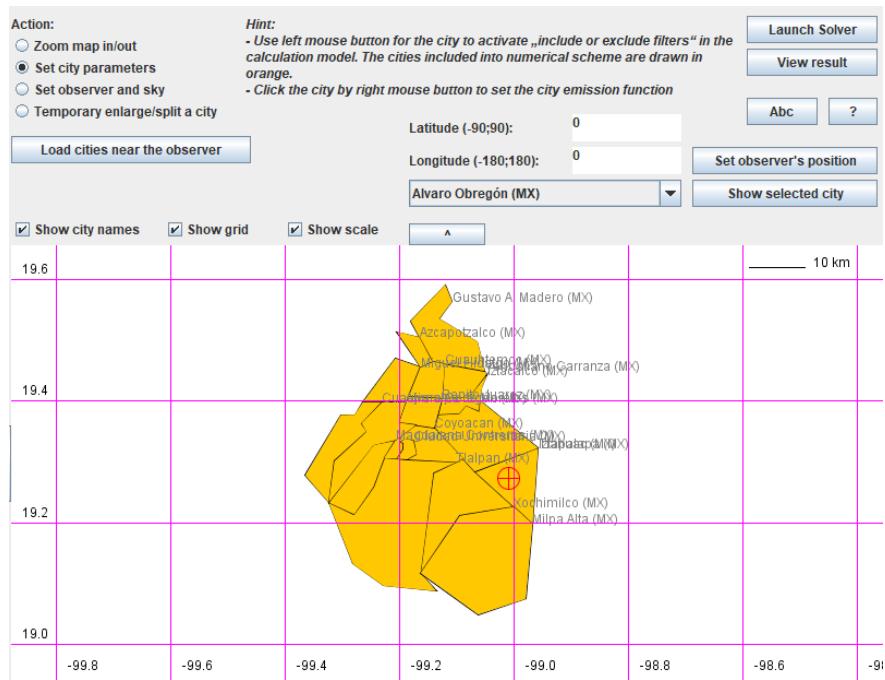


Figura 2.1: Interfaz gráfica del modelo *SkyGlow*

Inventario de fuentes de luz

El modelo calcula la emisión total de las fuentes de luz con base en la población (típicamente 750 lm por habitante) y su dependencia espectral *Para este estudio:* datos del **Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México** (Tabla 1.6).

Variables del caso de estudio

Una vez que el escenario está definido, el modelo requiere de parámetros específicos del experimento numérico que se desarrollará:

- Rango de longitud de onda: la máxima y mínima longitud de onda a estudiar. *Para este estudio:* rango visible del EE dividido en 40 ventanas de 10 nm con el fin de estimar el efecto de la dependencia espectral de las fuentes de luz reportadas en el **Inventario de Alumbrado Público de la Ciudad de México**
- Aerosol atmosférico: véase la **Subsección 1.2.3.** *Para este estudio:* los experimentos numéricos se realizaron considerando la climatología descrita en la **Subsección 1.5.2.** Para condiciones de fondo promedio (FP) se considera el Parámetro de Asimetría ASY = 0.6 y el Albedo de Dispersión Simple SSA = 0.85; Para especies carbonosas (EC, carbón elemental producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles y carbón orgánico) ASY = 0.3, SSA = 0.3. (Todos los parámetros constantes a lo largo del espectro estudiado) (Penner et al., 1998), (Schmidt et al., 2010).
- Nubosidad: altura y albedo espectral de la capa de nube. *Para este estudio:* véase la **Subsección 1.5.2**
- Posición del observador: en coordenadas (latitud y longitud)

2.1.2. Bases teóricas del modelo

La intensidad de la luz que crea el patrón del brillo del cielo en un volumen atmosférico elemental es la suma de todas las intensidades de todos los rayos emitidos de diferentes áreas en diferentes ángulos cenitales. Miroslav Kocifaj (2007) expresa la radiancia espectral ($\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2} \text{nm}^{-1}$) del cielo despejado como:

$$I_\lambda(z, \phi) = \frac{A_0 S_\lambda}{\cos z} \int_{h=0}^h B_\lambda(Q, q, z') \Gamma_\lambda(h, z, \phi, z', \phi') T_\lambda(h, z, \phi) \frac{\cos^2 z'}{h^2} dh \quad (2.1)$$

Donde λ es la longitud de onda a la que se emite la luz, z' y ϕ' son el ángulo cenital y acimutal de la luz emitida respectivamente, mientras que z y ϕ caracterizan la posición del elemento de cielo observado y h es su altura con respecto al observador P (Figura 2.2).

El primer término de la izquierda de la ecuación captura la emisión de las fuentes de luz (no dependen del observador) donde A_0 es un elemento de superficie de una fuente de luz que radia en todas direcciones y $S_{\lambda,0}$ es la potencia emitida por elemento de superficie A_0 de la fuente radiante ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$).

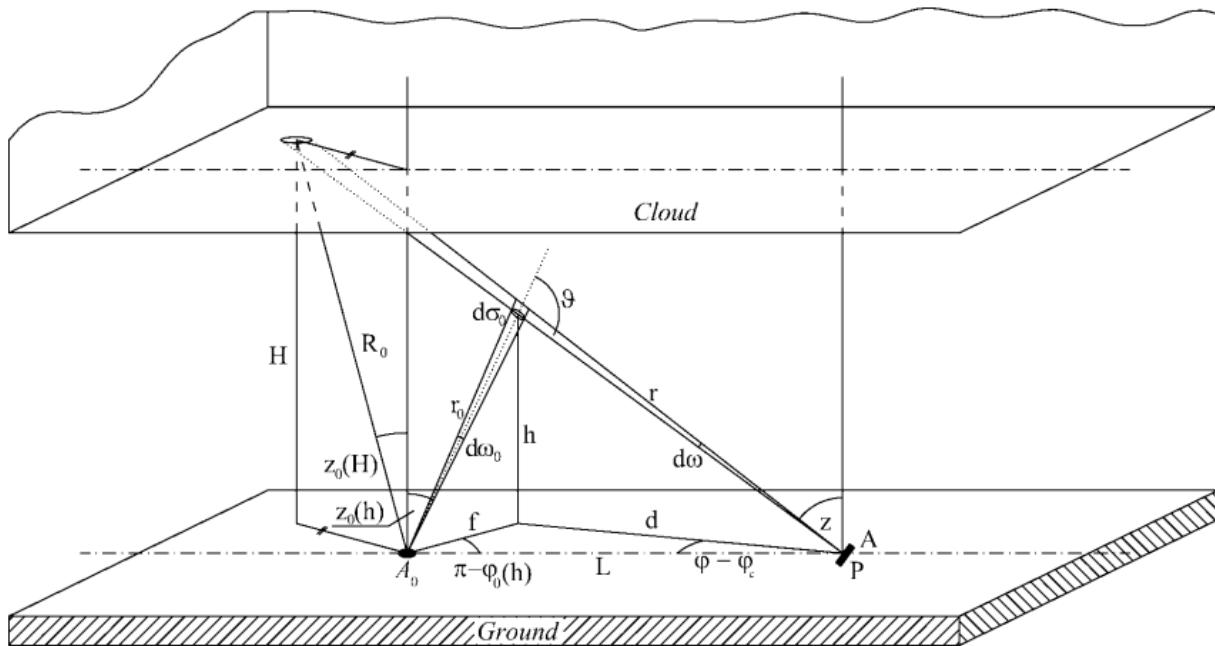


Figura 2.2: Geometría del modelo (Miroslav Kocifaj, 2007)

Los procesos capturados por los términos dentro de la integral se desarrollan en la atmósfera (por ello están integrados desde la superficie hasta la altura h). B es la Función de Emisión Urbana (CEF) abordada en la **Subsección 1.5.2**, esta función determina el comportamiento angular de la radiación emitida por las fuentes de luz; la aproximación semi-empírica a la CEF que Garstang (1986) (Garstang Emission Function, GEF) desarrolló es:

$$B(Q, q, z') = 2Q(1 - q)\cos z' + 0.554q z'^4 \quad (2.2)$$

Donde Q es la fracción de la luz que es reflejada isotrópicamente desde la superficie y q es la fracción radiada directamente hacia arriba, con respecto al ángulo cenital z' . La **Tabla 2.1** muestra los valores de q utilizados para este estudio.

Tabla 2.1: Fracción q radiada directamente hacia arriba en el ángulo cenital z' (Miroslav Kocifaj, 2007)

z'	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
q	1	0.95	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.15	0

Resulta importante mencionar que Miroslav Kocifaj and HA. Solano (2016) señalan la falta de validez de la GEF en algunos casos. La GEF sobreestima las emisiones en ángulos cenitales bajos debido a que estas son fácilmente suprimidas por obstáculos.

Sin embargo, ya que el modelo *SkyGlow* está basado en el Método de Órdenes de Dispersión Sucesivos (MODS)¹ con fuentes de tamaño finito, las deficiencias de la GEF no resultan críticas (Solano et al., 2017).

Continuando con el análisis de la ecuación 2.1, Γ es una función que caracteriza la distribución angular de la luz dispersada de un volumen elemental de la atmósfera en una altura h . Se calcula como el producto del coeficiente de dispersión y la función de fase de dispersión (véase la **Subsección 1.2.3**). Γ varía con el ángulo de dispersión ϑ en h , que a su vez depende de la dirección de observación, la dirección de los rayos emitidos y la distancia L entre la fuente de luz y el observador:

$$\cos \vartheta_h = \frac{1}{2} \left(\frac{L^2}{h^2} \cos z \cos z' - \frac{\cos z'}{\cos z} - \frac{\cos z}{\cos z'} \right) \quad (2.3)$$

Por último, T es una función que caracteriza la atenuación atmosférica en términos del AOD:

$$T_\lambda(h, z, \phi) = t_\lambda(h, z) t_\lambda(h, z') \quad (2.4)$$

Si la radiancia espectral $I_\lambda(z, \phi)$ es conocida, entonces la irradiancia espectral difusa en una superficie horizontal D_λ puede ser calculada (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014) como:

$$D_\lambda = \int_{z=0}^{z=\pi/2} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} I_\lambda(z, \phi) \sin z dz d\phi \quad (2.5)$$

Para el caso en que se considera cielo nublado, se suma a la ecuación 2.1 el término de la interacción del flujo de luz con una capa nubosa a una altura H :

$$I_{\lambda, Nube}(z, \phi) = S_\lambda \frac{A_0 \rho_\lambda(z'_H, z, \vartheta_H)}{\pi H^2} B_\lambda(Q, q, z'_H) T_\lambda(H, z, \phi) \cos^4 z'_H \quad (2.6)$$

Donde ρ es la reflectancia espectral de la nube, z'_H es el ángulo cenital de la luz emitida con respecto al elemento de área radiante de la nube y ϑ_H es el ángulo de dispersión en H . Sumando la ecuación 2.1 y 2.6 se obtiene la expresión para la radiancia espectral total con cielo nublado $I_{\lambda, Total}(z, \phi)$.

¹El MODS modela la intensidad de una señal dispersada a través de una expansión en serie de varios órdenes sucesivos. *SkyGlow* únicamente toma el primer orden de la serie (dispersión simple) (Solano et al., 2017)

Considerando que el punto del observador está rodeado de N fuentes de luz, donde las características radiativas de la i -ésima fuente son S_i , Q_i , q_i y la distancia y el ángulo acimutal de la i -ésima fuente son L_i y ϕ_i respectivamente. La cantidad total de la intensidad de la luz dispersada es calculada como la suma de todas las fuentes:

$$J(z, \phi) = \sum_{i=1}^N \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda,i}(z, \phi) d\lambda \quad (2.7)$$

2.1.3. Visualización de datos de salida

Las salidas del modelo son:

- irradiancia espectral (W m^{-2}) difusa en una superficie horizontal
- radiancia ($\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$) en z (0° - 85°), ϕ (0° - 360°)

Gráficas tipo *all-sky*

La distribución de la radiancia integral en el cielo se visualiza con gráficas polares del logaritmo de las salidas de radiancia del modelo (Figura 2.3). Estas gráficas se interpretan como la radiancia que llega a un observador desde todas las partes del cielo (180°), por lo que son denominadas gráficas tipo *all-sky*. El ángulo a lo largo del círculo representa el ángulo acimutal ϕ mientras que el ángulo cenital z es medido desde el centro hasta el margen de la gráfica.

El código fue desarrollado por el Dr. Miroslav Kocifaj de la Academia Eslovaca de Ciencias en gnuplot y está integrado en el modelo *SkyGlow*.

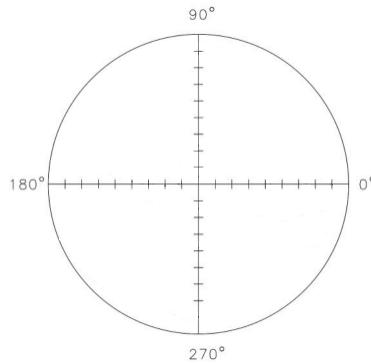


Figura 2.3: Gráfica polar

Mapa coroplético

El **Mapa Teórico de Contaminación Lumínica de la Ciudad de México** es un mapa coroplético de irradiancia espectral difusa en una superficie horizontal. El código desarrollado en Julia se presenta en el **Capítulo 6**.

2.2. El software *Radiance Light Trends*

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1. Tendencias de radiancia en las alcaldías de la Ciudad de México

3.2. Mapa de radiancia de la Ciudad de México

Tabla con niveles de radiancia en otras ciudades y comparar

3.3. Gráficas tipo *all sky* de distribución de radiancia

3.4. Experimentos numéricos

3.4.1. Cambio del tipo de luminarias en la Ciudad de México

LED, vapor de sodio

Por el potencial ahorro económico que supone, se está llevando a cabo una gran sustitución de instalaciones de alumbrado público cambiando fuentes tradicionales -en muchos casos de vapor de sodio a alta presión- por LED.

3.4.2. Influencia del aerosol atmosférico en la distribución de radiancia

En el cenit y en una esfera

3.4.3. Influencia de la nubosidad en la distribución de radiancia

The correct interpretation of sky radiance or luminance distributions experimentally determined under overcast conditions requires the theoretical treatment of light scattering processes in an inhomogeneous atmosphere. Solano 2015

En el cenit y en una esfera para TODO tipo de nubes

Capítulo 4

Conclusiones

Capítulo 5

Recomendaciones

Figura de Luis que hace necesario conocer como se comporta la luz en nube de hielo. Ya que son tan abundantes, valdría la pena investigar cómo se comporta la luz en una nube de hielo.
Estudios fotométricos con IUna y toda la cosa en la REPSA para proponerlo como Urban Night Sky Place.^{en} el programa IDA.

Validación de los datos con respecto a la campaña en info sugerida (libreta).

Programa de Racionalidad Presupuestal UNAM

Proyecto comparación de modelos con Héctor Linares Universidad de Barcelona (Aube y Kocifaj)

Make lighting healthier

Capítulo 6

Anexos

Referencias

- Arguijo, T. (2018). Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la lgeepa.
- Aubé, M., Franchomme, L., Robert, P., and Houle, V. (2005). Light pollution modeling and detection in a heterogeneous environment. *Proceedings of SPIE*, 589:1–12.
- Bertiau, F., Graeve, E., and Treanor, P. (1973). The artificial night-sky illumination in Italy. *Vatican Observatory Publications*, 1:159–179.
- Born, M. and Wolf, E. (2003). Principles of optics. *Cambridge University Press*.
- Carabali, G., Estévez, H., Valdés-Barrón, M., Bonifaz-Alfonzo, R., Riveros-Rosas, D., Velasco-Herrera, V., and Vázquez-Gálvez, F. (2017). Aerosol climatology over the Mexico City basin: characterization of optical properties. *Atmospheric Research*, 194:190–201.
- Comisión Reguladora de Energía (2017). Factor de Emisión del Sector Eléctrico Nacional.
- Comité Español de Iluminación (2017). Posibles riesgos de la iluminación LED.
- Conway, S. (2000). The Cambrian explosion: slow-fuse or megatonnage? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9):4426–4429.
- Davies, T., Bennie, J., Inger, R., Hempel, N., and Gaston, K. (2013). Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, 19(5).
- DJ. Stevenson (1987). Origin of the Moon - the collision hypothesis. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 15:271–315.
- Dunbar, R. and Growlett, J. (2014). Fireside chat: the impact of fire on hominin socioecology. *Oxford University Press*.
- Duvall, N. (1988). Domestic technology: a chronology. *G. K. Hall Company Editors*.
- Elvidge, C., Keith, D., Tuttle, B., and Baugh, K. (2010). Spectral identification of lighting type and character. *Sensors*, 10:3961–3988.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Portnov, B., Rybnikova, N., and Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6):1–25.
- Foot, J. and Leeson, M. (1987). Aerosol single-scattering albedo: a method for obtaining climatology data. *Atmospheric Environment*, 21(7):1665–1670.
- Garstang, R. (1986). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98:364–375.
- Garstang, R. (1991). Dust and light pollution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103:1109–1116.
- Gil, M. G., Páramo, R. S. M., Solano, H., and Payàs, P. F. (2012). Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial. *Universidad Politécnica de Cataluña*.

- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2013a). Light pollution in ultraviolet and visible spectrum: effect on different visual perceptions. *PLOS ONE*, 8(2):1–15.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2013b). Skyglow effects in uv and visible spectra: radiative fluxes. *Journal of Environmental Management*, 127:300–307.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2014). Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443:3665–3674.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015). Urban night-sky luminance due to different cloud types: a numerical experiment. *Lighting Research and Technology*, 0:1–17.
- Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J. (2008). Fundamentals of physics. *John Wiley and Sons, Inc.*
- Hanel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., Kollath, Z., Lolkema, D., Moore, C., Schmidt, N., Spoelstra, H., Wuchterl, G., and Kyba, C. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205:278–290.
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A. (1998). AERONET. A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1):1–16.
- Holker, F., Wolter, C., Perkin, E., and Tockner, K. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(12):681–682.
- Hudson, P. (1992). The industrial revolution. *Chapman and Hall Editors.*
- Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México (2019). Petición electrónica de datos.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). Encuesta intercensal.
- JC. Dunlap (1999). Molecular bases for circadian clocks. *Cell*, 96:271–290.
- JS. Greaves (2005). Disks around stars and the growth of planetary systems. *Science*, 307(68–71).
- Jáuregui, E. (2002). The Climate of the Mexico City Air Basin: Its Effects on the Formation and Transport of Pollutants. *Urban Air Pollution and Forests*, 156:86–117.
- Kanniah, K., Beringer, J., Tapper, N., and Long, C. (2009). Aerosols and their influence on the radiation partitioning and savanna productivity in northern Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 100(3):423–438.
- Kaskaoutis, D., Kambezidis, H., Hatzianastassiou, N., Kosmopoulos, P., and Badarinath, K. (2007). Aerosol climatology: dependence of the Angstrom exponent on wavelength over four AERONET sites. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7:7347–7397.
- Kyba, C., Mohar, A., and Posch, T. (2017). How bright is moonlight? *Astronomy and Geophysics*, 58(1):131–132.
- Leinert, C., Bowyer, S., Haikala, L., Hanner, M., and Hauser, M. (1998). The 1997 reference of diffuse night sky brightness. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1(127):1–99.

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2018).
- Linares, H., Masana, E., Ribas, S., Gil, M., Figueras, F., and Aubé, M. (2018). Modeling the night sky brightness and light pollution sources of montsec protected area. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 217:178–188.
- 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*.
- Marin, C. (2009). Starlight: a common heritage. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5:449–456.
- Matthews, G. (2008). Celestial body irradiance determination from an underfilled satellite radiometer: application to albedo and thermal emission measurements of the Moon using CERES. *Applied Optics*, 47(27):4981–4993.
- Met Office UK (2019). metoffice.gov.uk.
- Meyer, J. (1968). Radiometry and photometry: units and conversion factors. *Applied Optics*, 7(10):2081–2084.
- Miroslav Kocifaj (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied Optics*, 46(15):3013–3022.
- Miroslav Kocifaj and HA. Solano (2014). Skyglow: a retrieval of the approximate radiant intensity function of ground-based light sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439:3405–3413.
- Miroslav Kocifaj and HA. Solano (2016). Angular emission function of a city and skyglow modeling: a critical perspective. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128:1–16.
- Miroslav Kocifaj and Thomas Posch and HA. Solano (2015). On the relation between zenith sky brightness and horizontal illuminance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(3):2895–2901.
- 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.
- Penner, J., Chuang, C., and Grant, K. (1998). Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosols. *Climate Dynamics*, 14:839–851.
- Página Oficial de la REPSA (2019). repsa.unam.mx.
- Programa GEI México (2013). geimexico.org.
- Purcell, E. and Morin, D. (2013). Electricity and magnetism. Cambridge University Press.
- Ramos, L. and Montenegro, M. (2012). La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(4):197–211.
- Ribas, S. (2015). Caracterizació de la contaminació lumínica en zones protegides i urbanes. *Tesis Doctoral Universitat de Barcelona*.

- Rich, C. and Longcore, T. (2006). Ecological consequences of artificial night lighting. *Island Press*.
- Schmidt, K., Pilewskie, P., Bergstrom, R., Coddington, O., Redemann, J., Livingston, J., Russell, P., Bierwirth, E., Wendisch, M., Gore, W., Dubey, M., and Mazzoleni, C. (2010). A new method for deriving aerosol solar radiative forcing and its first application within MILAGRO/INTEX-B. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 10:7829–7843.
- Schulte, N., Dannemann, E., and Meier, J. (2018). Light pollution. A global discussion. *Helmholtz Centre for Environmental Research*.
- Secretaría de Energía (2013). Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2013-2027.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2016). Suelo de Conservación.
- Solano, H., Kocifaj, M., Aubé, M., Miller, N., Perrin, T., and Kinzey, B. (2017). An Investigation of LED Street Lighting's Impact on Sky Glow. *U.S. Department of Energy*.
- Stare, J. and Kyba, C. (2019). Radiance Light Trends. *GeoForschungsZentrum Data Services*.
- Stone, T. (2017). The value of darkness: a moral framework for urban nighttime lighting. *Science and Engineering Ethics*, 24(2018):607–628.
- T. Gallaway and R. Olsen and D. Mitchell (2010). The economics of global light pollution. *Eco-logical Economics*, 69.
- Twomey, S. (1967). Light scattering by cloud layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24:70–79.
- UNESCO and CONACyT and AMC (2016). Derecho a los cielos oscuros.
- Unidad de Transparencia de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2018). Petición electrónica de datos.
- Uribe, H. (2014). De ecosistema a socioecosistema diseñado como territorio del capital agroindustrial. *Revista Colombiana de Sociología*, 37:121–157.
- Urquiza, A. and Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a la vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire des Amériques*, 218:1–18.
- Ávila, V. and Perevochtchikova, M. (2019). Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en oaxaca, méxico. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Wiesnner, P. (2014). Embers of society: firelight talk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 39:14027–14035.
- World Meteorological Organization (1987). International Cloud Atlas.
- Wrangham, R. and Carmody, R. (2010). Human adaptation to the control of fire. *Evolutionary Anthropology*, 19(5):187–199.
- Zari, M. P. (2018). The importance of urban biodiversity - an ecosystem services approach. *Biodiversity International Journal*, 2(4):357–360.