



GRADO EN COMERCIO

TRABAJO FIN DE GRADO

“Efectos de la iluminación exterior sobre la biodiversidad”

D. JAIME VÁZQUEZ DE PRADA HEREDERO

FACULTAD DE COMERCIO

VALLADOLID



FACULTAD DE COMERCIO

Universidad de Valladolid

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
GRADO EN COMERCIO

CURSO ACADÉMICO 2020/2021

TRABAJO FIN DE GRADO

“Efectos de la iluminación exterior sobre la biodiversidad”

Trabajo presentado por D. Jaime Vázquez de Prada Heredero

Tutora: D. Felicidad Viejo Valverde

FACULTAD DE COMERCIO

Universidad de Valladolid

1. Introducción	2
2. Marco teórico	3
2.1 Qué es la luz	3
2.2 Espectro electromagnético	4
2.3. Propiedades ópticas de la materia.....	10
2.4 Sentido de la iluminación.....	11
2.5 Historia de la iluminación.....	12
Iluminación por combustión (iluminando con fuego)	12
Iluminación a partir del siglo XIX.....	14
Tecnología actual LED (Light Emitting Diode- Diodo emisor de luz)	17
3. La contaminación lumínica y sus efectos sobre el medio ambiente	21
4. Efectos de la iluminación exterior artificial sobre la biodiversidad	22
4.1 Efectos derivados de la producción de electricidad.	23
4.2 Efectos de la contaminación lumínica sobre el cielo nocturno.	27
4.3 Efectos de la iluminación exterior artificial sobre la fauna y la flora.....	34
4.4 Efectos de la iluminación exterior artificial sobre el ser humano.	40
5. Malas actuaciones en iluminación.....	43
6. Aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar un proyecto de iluminación.	51
7. Conclusiones.	53
8. Bibliografía:.....	55

1. Introducción

El trabajo realizado trata de analizar y determinar mediante un análisis técnico-teórico las posibles soluciones que puede aportar la nueva tecnología en materia de iluminación, frente a los efectos perjudiciales de la contaminación lumínica tanto de índole medioambiental, como económica o biológica.

He elegido este tema por el elevado desconocimiento de este mercado y la proyección de futuro que tiene. La iluminación exterior, tanto funcional como decorativa, cumple funciones clave en el desarrollo de la actividad humana en las ciudades. Es interesante cómo un desarrollo tecnológico en este tipo de tecnologías puede llegar a afectar en la calidad del sueño de las personas, y si no se elige responsablemente, atendiendo a las necesidades del entorno, puede variar el comportamiento migratorio o reproductivo de aves, mamíferos y otras especies.

Llevamos mucho tiempo escuchando hablar de la Smart City y la iluminación exterior artificial juega un papel clave para la instauración de estas. Luminarias inteligentes, interconectadas, capaces de crear una red de comunicación entre ellas, para gestionar sus consumos, rendimientos, temperaturas de color... todo ello para conseguir una mejor eficiencia energética, un mejor confort visual para los usuarios y disponer en las ciudades de un sistema único de gestión que automáticamente, a partir de la comunicación que se ofrece de cada dispositivo pueda gestionar la iluminación, las rutas de recogida de basura, la gestión del riego de parques, transporte público, el tráfico de vehículos, etc.

El contenido de este trabajo está estructurado de la siguiente manera:

- En primer lugar, se expondrá en el marco teórico el concepto de la luz, así como sus principales características y propiedades físicas.
- Se mostrará el análisis que se va a llevar a cabo mediante una revisión de los efectos nocivos de la contaminación lumínica derivados de la iluminación inadecuada ya sea por el mal uso de la tecnología actual (tecnología LED) como por los efectos de las tecnologías pasadas.
- Se expondrán los efectos negativos de la iluminación inadecuada a nivel problemática energética y medioambiental, impactos en el cielo nocturno, comportamiento, calidad de vida y reproducción de los animales, impacto sobre

el desarrollo de la flora autóctona, así como el impacto sobre la actividad del ser humano.

- Se enumerarán las posibles soluciones y desarrollos tecnológicos, que han de ser tenidos en cuenta a la hora de realizar un proyecto de iluminación.

2. Marco teórico

Cuando hablamos de luz, normalmente desconocemos, la cantidad de aspectos y características que este concepto tiene. La luz, puede tener infinidad de composiciones, colores... y esa es la parte visible, también existe una parte que es invisible para el ojo humano y conviene conocerla.

2.1 Qué es la luz

La luz es la radiación electromagnética que puede ser detectada por el ojo humano. La radiación electromagnética se produce en una amplísima gama de longitudes de onda, desde los rayos gamma con longitudes de onda inferiores a 1×10^{-11} metros aproximadamente hasta las ondas de radio medidas en metros. Dentro de ese amplio espectro, las longitudes de onda visibles para el ser humano ocupan una banda muy estrecha, desde unos 700 nanómetros (nm; milmillonésima parte de un metro) para la luz roja hasta unos 400 nm para la luz violeta. Las regiones espectrales adyacentes a la banda visible suelen denominarse también luz, infrarroja en un extremo y ultravioleta en el otro. La velocidad de la luz en el vacío es una constante física fundamental, cuyo valor en la actualidad aceptado es exactamente 299.792.458 metros por segundo.

Ninguna respuesta a la pregunta "¿Qué es la luz?" satisface los múltiples contextos en los que se experimenta, explora y explota la luz. El físico se interesa por las propiedades físicas de la luz, el artista por la apreciación estética del mundo visual. A través del sentido de la vista, la luz es una herramienta primordial para percibir el mundo y comunicarse con él. La luz del Sol calienta la Tierra, impulsa los patrones climáticos globales e inicia el proceso de fotosíntesis, que mantiene la vida. A gran escala, las interacciones de la luz con la materia han contribuido a dar forma a la estructura del universo. De hecho, la luz proporciona una ventana al universo, desde la escala cosmológica hasta la atómica. Casi toda la información sobre el resto del universo llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. Al interpretar esa radiación, los astrónomos pueden vislumbrar las primeras épocas del universo, medir la expansión general del mismo y determinar la composición química de las estrellas y del medio interestelar. Al igual que la invención del telescopio amplió espectacularmente la

exploración del universo, la invención del microscopio abrió el intrincado mundo de la célula. El análisis de las frecuencias de la luz emitida y absorbida por los átomos fue un impulso principal para el desarrollo de la mecánica cuántica. Las espectroscopias atómicas y moleculares siguen siendo herramientas primordiales para sondear la estructura de la materia, proporcionando pruebas ultrasensibles de los modelos atómicos y moleculares y contribuyendo a los estudios de las reacciones fotoquímicas fundamentales.

La luz transmite información espacial y temporal. Esta propiedad constituye la base de los campos de la óptica y las comunicaciones ópticas y de un sinnúmero de tecnologías relacionadas, tanto maduras como emergentes. Las aplicaciones tecnológicas basadas en la manipulación de la luz incluyen los láseres, la holografía y los sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica.

En la mayoría de las circunstancias cotidianas, las propiedades de la luz pueden derivarse de la teoría del electromagnetismo clásico, en la que la luz se describe como campos eléctricos y magnéticos acoplados que se propagan por el espacio como una onda viajera. Sin embargo, esta teoría ondulatoria, desarrollada a mediados del siglo XIX, no es suficiente para explicar las propiedades de la luz a intensidades muy bajas. A ese nivel se necesita una teoría cuántica para explicar las características de la luz y las interacciones de ésta con los átomos y las moléculas. En su forma más sencilla, la teoría cuántica describe la luz como si estuviera formada por paquetes discretos de energía, llamados fotones. Sin embargo, ni el modelo clásico de ondas ni el modelo clásico de partículas describen correctamente la luz; ésta tiene una naturaleza dual que sólo se revela en la mecánica cuántica. Esta sorprendente dualidad onda-partícula es compartida por todos los componentes primarios de la naturaleza (por ejemplo, los electrones tienen aspectos tanto de partícula como de onda). Desde mediados del siglo XX, los físicos consideran completa una teoría más completa de la luz, conocida como electrodinámica cuántica (QED). La QED combina las ideas del electromagnetismo clásico, la mecánica cuántica y la teoría especial de la relatividad.

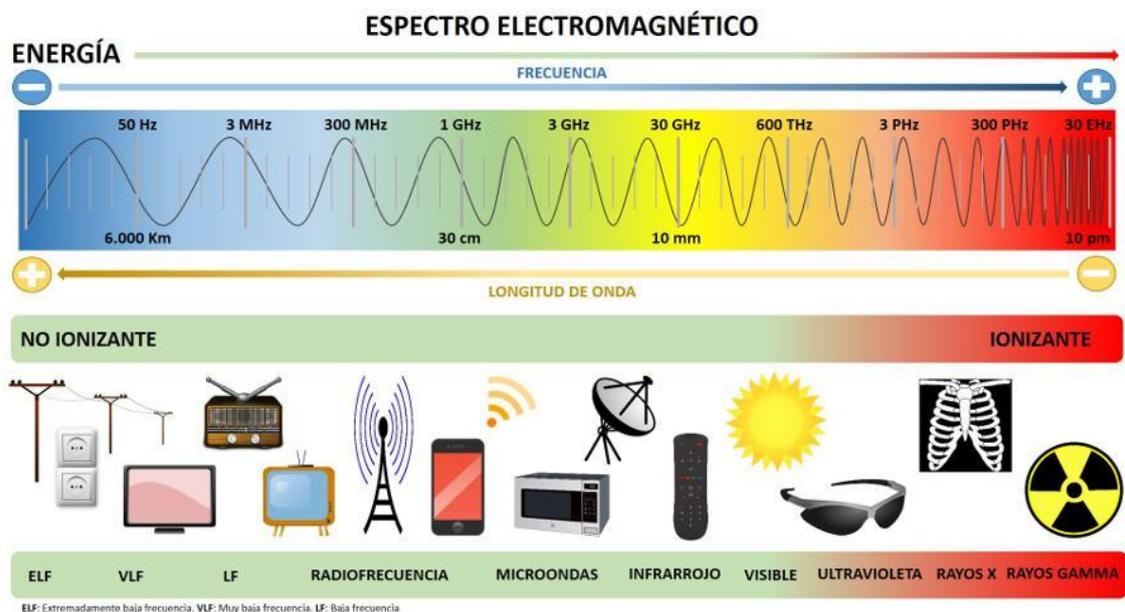
2.2 Espectro electromagnético

Dado que las radiaciones electromagnéticas son de la misma naturaleza y todas se propagan en el vacío a la misma velocidad ($v = 3 \cdot 10^8$ m/s), las características que las diferencian son:

- Longitud de onda: se define como la distancia recorrida por la onda en un periodo. En una onda transversal se puede definir como la distancia entre dos máximos consecutivos o entre otros dos puntos cualesquiera que se encuentren en la misma fase.
- Frecuencia: se define como el número de periodos que tienen lugar en la unidad de tiempo.
- Velocidad de propagación, podemos definir la velocidad de propagación de una onda como la velocidad a la que avanza la perturbación por el medio (se expresa en metros por segundo). La velocidad de propagación depende del tipo de onda, de la elasticidad del medio y de su rigidez. Si el medio es homogéneo e isótropo, la velocidad de propagación es la misma en todas las direcciones. Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido en el aire, a 20 °C, es de 343'5 m/s, mientras que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es de 300.000 km/s = $3 \cdot 10^8$ m/s.

Entre las radiaciones electromagnéticas debemos incluir:

Ilustración 1. Espectro Electromagnético



Ondas de radio

Las ondas de radio son ondas EM (electromagnéticas) que tienen una longitud de onda entre 1 milímetro y 100 kilómetros (o 300 GHz y 3 kHz de frecuencia).

Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética (EM) con longitudes de onda en el espectro electromagnético más largas que la luz infrarroja. Tienen frecuencias que van desde los 300 GHz hasta los 3 kHz, y sus correspondientes longitudes de onda van desde 1 milímetro hasta 100 kilómetros. Como todas las demás ondas electromagnéticas, las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz. Las ondas de radio que se producen de forma natural son producidas por los rayos o por objetos astronómicos. Las ondas de radio generadas artificialmente se utilizan para las comunicaciones de radio fijas y móviles, la radiodifusión, los radares y otros sistemas de navegación, los satélites de comunicaciones, las redes informáticas y otras innumerables aplicaciones.

Microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas con longitudes de onda que van de un metro a un milímetro (frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz).

Las microondas son ondas electromagnéticas cuya longitud de onda oscila entre un metro y un milímetro, o lo que es lo mismo, con frecuencias entre 300 MHz (0,3 GHz) y 300 GHz. En general, se considera que la región de microondas del espectro electromagnético (EM) se solapa con las ondas de radio de mayor frecuencia (longitud de onda más corta). Como ocurre con todas las ondas EM, las microondas viajan en el vacío a la velocidad de la luz. El prefijo "micro" en "microondas" no pretende sugerir una longitud de onda en el rango de los micrómetros. Indica que las microondas son "pequeñas" porque tienen longitudes de onda más cortas en comparación con las ondas utilizadas en la radiodifusión típica. Los límites entre la luz infrarroja lejana, la radiación de Terahercios, las microondas y las ondas de radio de ultra alta frecuencia son bastante arbitrarios. Se utilizan de forma variada entre los distintos campos de estudio (véase la figura).

Luz infrarroja

La luz infrarroja (IR) es una radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que las de la luz visible, de 0,74 μm a 1 mm (de 300 GHz a 1 THz).

La luz infrarroja (IR) es una radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que las de la luz visible, que se extiende desde el borde rojo nominal del espectro visible a 0,74 micrómetros (μm) hasta 1 mm. Este rango de longitudes de onda corresponde a una gama de frecuencias de aproximadamente 300 GHz a 400 THz, e incluye la mayor parte de la radiación térmica emitida por objetos cercanos a la

temperatura ambiente. La luz infrarroja es emitida o absorbida por las moléculas cuando cambian sus movimientos rotacionales-vibracionales.

La parte infrarroja del espectro electromagnético abarca el rango comprendido entre aproximadamente 300 GHz (1 mm) y 400 THz (750 nm). Puede dividirse en tres partes: Puede dividirse en tres partes:

1. El infrarrojo lejano, de 300 GHz (1 mm) a 30 THz (10 μm)
2. El infrarrojo medio, de 30 a 120 THz (10 a 2,5 μm)
3. El infrarrojo cercano, de 120 a 400 THz (2.500 a 750 nm)

Luz visible

La luz visible, es la parte del espectro electromagnético que es visible (puede ser detectada por) el ojo humano. La radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda suele denominarse simplemente "luz". Un ojo humano típico responderá a longitudes de onda de aproximadamente 390 a 750 nm (0,39 a 0,75 μm). En términos de frecuencia, esto corresponde a una banda cercana a los 400-790 THz. Un ojo adaptado a la luz suele tener su máxima sensibilidad en torno a los 555 nm (540 THz), en la región verde del espectro óptico. Sin embargo, el espectro no contiene todos los colores que los ojos y el cerebro humanos pueden distinguir. Los colores no saturados, como el rosa, o las variantes de la púrpura, como el magenta, están ausentes, por ejemplo, porque sólo pueden producirse mediante una mezcla de múltiples longitudes de onda.

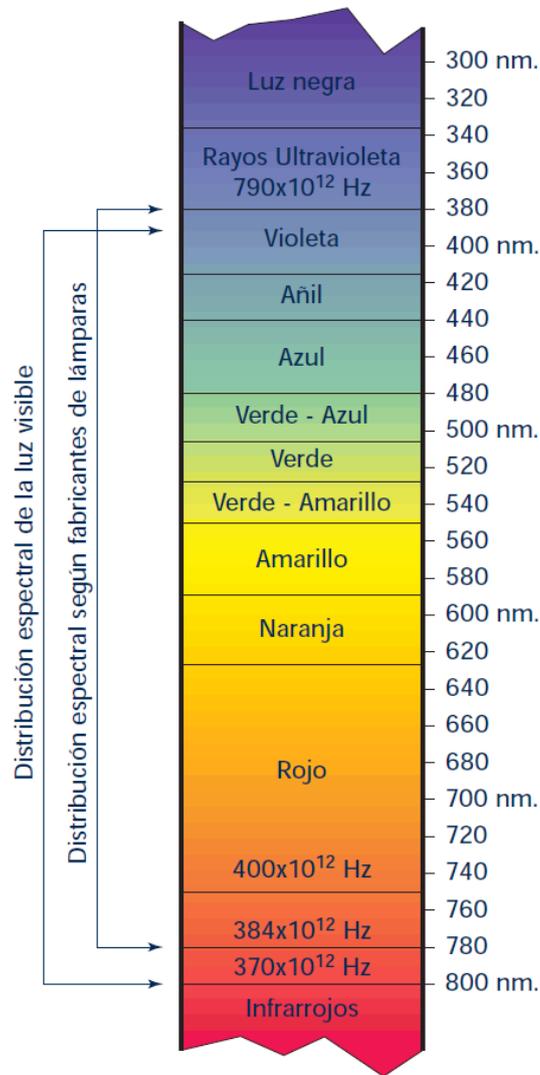
La luz visible se produce por las vibraciones y rotaciones de los átomos y las moléculas, así como por las transiciones electrónicas dentro de los átomos y las moléculas. Los receptores o detectores de la luz utilizan en gran medida las transiciones electrónicas. Decimos que los átomos y las moléculas se excitan cuando absorben y se relajan cuando emiten mediante transiciones electrónicas.

La ilustración 2 se muestra esta parte del espectro, junto con los colores asociados a determinadas longitudes de onda puras. La luz roja tiene las frecuencias más bajas y las longitudes de onda más largas, mientras que el violeta tiene las frecuencias más altas y las longitudes de onda más cortas. La radiación del cuerpo negro del Sol alcanza su punto máximo en la parte visible del espectro, pero es más intensa en el rojo que en el violeta, lo que hace que el Sol tenga un aspecto amarillento.

Los colores que puede producir la luz visible de una banda estrecha de longitudes de onda (luz monocromática) se denominan colores espectrales puros.

Cuantitativamente, las regiones del espectro visible que abarcan cada color espectral pueden delimitarse aproximadamente como se puede observar en la siguiente ilustración.

Ilustración 2 Distribución espectral de la luz visible



Fuente: Manual práctico de INDALUX (2002). Luminotecnia.

Hay que tener en cuenta que cada color puede tener muchos matices, ya que el espectro es continuo. El ojo humano es insensible a la radiación electromagnética fuera de este rango. Por definición, cualquier imagen presentada con datos registrados a partir de longitudes de onda distintas a las de la parte visible del espectro (como las imágenes IR de seres humanos o animales o las imágenes astronómicas de rayos X) son necesariamente en falso color.

Ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) es una radiación electromagnética con una longitud de onda más corta que la de la luz visible, pero más larga que la de los rayos X, es decir, en el rango de 10 nm a 400 nm, correspondiente a energías de fotones de 3 eV a 124 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$; las radiaciones electromagnéticas con frecuencias más altas que las de la luz visible suelen expresarse en términos de energía en lugar de frecuencia). Se llama así porque el espectro consiste en ondas electromagnéticas con frecuencias más altas que las que los humanos identifican como el color violeta. Estas frecuencias son invisibles para los humanos, pero visibles para algunos insectos y aves.

La radiación UV solar se suele subdividir en tres regiones: UV-A (320-400 nm), UV-B (290-320 nm) y UV-C (220-290 nm), ordenadas de mayor a menor longitud de onda (de menor a mayor energía). La mayor parte de los UV-B y todos los UV-C son absorbidos por las moléculas de ozono (O_3) de la atmósfera superior. En consecuencia, el 99% de la radiación UV solar que llega a la superficie de la Tierra es UV-A.

Existen otros esquemas para dividir la radiación UV en diferentes categorías, otra común es: ultravioleta cercano (NUV - 300-400 nm), ultravioleta medio (MUV - 200-300 nm), ultravioleta lejano (FUV - 200-122 nm) y ultravioleta extremo (EUV- 121-10 nm).

Rayos X

Los rayos X son ondas electromagnéticas con longitudes de onda en el rango de 0,01 a 10 nanómetros, que corresponden a frecuencias en el rango de 30 petahercios a 30 exahercios ($3 \times 10^{16} \text{ Hz}$ a $3 \times 10^{19} \text{ Hz}$) y energías en el rango de 100 eV a 100 keV. Su longitud de onda es más corta que la de los rayos UV y más larga que la de los rayos gamma. En muchos idiomas, la radiación X se denomina radiación Röntgen, en honor a Wilhelm Röntgen, a quien se suele atribuir el mérito de haberla descubierto, y que la denominó radiación X para referirse a un tipo de radiación desconocido.

En las aplicaciones de diagnóstico médico, los rayos X de baja energía (blandos) no son deseados, ya que son totalmente absorbidos por el cuerpo, aumentando la dosis de radiación sin contribuir a la imagen. Por ello, se suele colocar una fina lámina metálica, a menudo de aluminio, llamada filtro de rayos X, sobre la ventana del tubo de rayos X, que absorbe la parte de baja energía en el espectro. Esto se denomina endurecer el haz, ya que desplaza el centro del espectro hacia los rayos X de mayor energía (o más duros).

Rayos Gamma

La radiación gamma, también conocida como rayos gamma o guionizada como rayos gamma y denotada como γ , es una radiación electromagnética de alta frecuencia y, por tanto, de alta energía. Los rayos gamma suelen tener frecuencias superiores a 10 exahercios (o $>10^{19}$ Hz) y, por tanto, tienen energías superiores a 100 keV y longitudes de onda inferiores a 10 picómetros (menos que el diámetro de un átomo). Sin embargo, no se trata de una definición estricta, sino más bien de una descripción general de los procesos naturales. Los rayos gamma procedentes de la desintegración radiactiva se definen como rayos gamma independientemente de su energía, por lo que no existe un límite inferior para la energía gamma derivada de la desintegración radiactiva. La desintegración gamma suele producir energías de unos cientos de keV, y casi siempre inferiores a 10 MeV.

Los rayos gamma son radiaciones ionizantes y, por tanto, biológicamente peligrosas. Se producen clásicamente por la desintegración de estados de alta energía de los núcleos atómicos, un proceso llamado desintegración gamma, pero también se crean por otros procesos. Paul Villard, químico y físico francés, descubrió la radiación gamma en 1900, mientras estudiaba la radiación emitida por el radio durante su desintegración gamma. La radiación de Villard fue bautizada como "rayos gamma" por Ernest Rutherford en 1903.

2.3. Propiedades ópticas de la materia

Cuando un rayo de luz se propaga a través de un medio (aire) y llega a la frontera entre éste y un segundo medio (cristal), puede volver al primer medio (reflexión) o atravesarlo y entrar en el segundo medio, donde parte de él se convertirá en otra forma de energía (absorción). Una parte de la energía volverá al primer medio (reflexión), o lo atravesará y pasará al segundo medio, donde una parte se convertirá en otra forma de energía (absorción) y otros permanecerán sin cambios (transmisión).

Dos, o los tres, de estos fenómenos ocurren simultáneamente, y como la energía ni se crea ni se destruye, la suma de la energía transmitida, absorbida y transmitida es la misma. La energía transmitida, absorbida y reflejada debe ser igual a la energía incidente.

Por lo tanto, la aplicación de la luz de la forma más práctica requiere un control y una distribución, que se consigue modificando sus características a merced a los fenómenos físicos de reflexión, absorción y transmisión de la luz.

Estos conceptos son importantes para nuestro estudio, ya que los efectos de la iluminación exterior artificial, pueden llegar a verse reducidos o agravados por su reflexión sobre materiales o por las pérdidas de rendimiento producidas por un cierre ineficiente que absorba un porcentaje muy grande de la luz emitida.

2.4 Sentido de la iluminación

El objetivo de la iluminación es aumentar la eficiencia de las actividades humanas durante el tiempo en que está oscuro y hacer que la producción, el transporte, la construcción, etc. en las horas nocturnas sean eficientes, seguras y confortables.

Por ello, se entiende que la iluminación, ya desde nuestros inicios, era una necesidad. En los primeros días la actividad humana estaba limitada por la capacidad de percibir los estímulos y el entorno y esa percepción dependía de la luz durante las horas del día, ya que las actividades primigenias de los clanes paleolíticos como la caza, dependían de la capacidad de percibir a la presa y las características del entorno (áreas, obstáculos...).

El ser humano se caracteriza en sus inicios por ser un animal diurno, toda la actividad se realizaba bajo el cobijo y la protección de la luz solar. La noche, era una parte del tiempo no utilizado o dedicado al descanso. Esto se debe a la presencia de posibles depredadores, a la incapacidad de detectar barreras u obstáculos, al descenso de las temperaturas, a la necesidad de descansar, a las limitaciones fisiológicas oculares del ser humano y su incapacidad de adaptarse plenamente a un hábitat oscuro...

Ante esta limitación temporal, el ser humano ya en sus primeros momentos comenzó a emplear elementos que permitiesen alargar sus actividades a las horas nocturnas. Existen evidencias históricas del empleo de la iluminación en cuevas y en el exterior mucho antes del neolítico.

Por ello, la iluminación, aporta unos beneficios muy grandes al ser humano. Amplia las horas de actividad, fomenta la salida al exterior ayudando a socializar, aumenta la seguridad en las calles reduciendo los índices de criminalidad y vandalismo y aportando al ciudadano una visión clara y nítida del entorno, permite mejorar la visibilidad en

interiores donde el efecto de la luz solar sea reducido, beneficia el ocio nocturno de las personas, dota a los espacios de una iluminación acorde a la actividad que se realice, ayuda a realizar transportes seguros y rápidos, es un elemento decorativo que embellece la ciudad...

La iluminación (tanto interior como exterior) es una parte fundamental para el desarrollo de nuestras vidas, muchas veces nos somos conscientes de lo que nos aporta, pero sin ella nuestras vidas serían muy diferentes.

2.5 Historia de la iluminación

La luz es el estímulo físico que permite la visión, un proceso de complejidad casi inimaginable que nos permite comprender y responder al mundo que nos rodea. Pero depender de la luz natural nos dejaría (literal y figuradamente) a oscuras la mayor parte del tiempo. Por ello, la historia de la iluminación es la historia de nuestro aprendizaje del arte técnico de producir y suministrar luz.

Iluminación por combustión (iluminando con fuego)

Durante muchos milenios, la iluminación se basó en la gestión de la combustión de los combustibles. Los primeros registros de la producción de fuego aparecen en el Neolítico, hace unos 10.000 años. En 1991, los científicos descubrieron un hombre neolítico, apodado "Otzi", que se conservó en un glaciar alpino. Otzi llevaba en su cinturón un kit para hacer fuego: pedernales, pirita para sacar chispas, un hongo seco en polvo para la yesca y brasas de cedro envueltas en hojas.

La madera fue el primer combustible utilizado para el alumbrado. Los poemas de Homero de hace casi 3.000 años relatan el uso de antorchas de pino resinoso. La brea resinosa es muy inflamable y luminosa cuando se quema. Probablemente se utilizaba en su estado natural, ya que rezumaba de las coníferas.

En la época romana, la brea se fundía y se untaba en palos atados para hacer antorchas más controlables. Más tarde, la madera tratada con brea se quemaba en cuencos o cubos metálicos calados, llamados cressets, que hacían que la luz fuera portátil. En la época medieval, el procesamiento de la brea de los árboles de coníferas era un oficio regido por los gremios.

Hace más de 4.500 años, en Ur, una antigua ciudad del sur de Mesopotamia (actual Irak), surgieron pruebas de que se quemaba aceite en las lámparas. Los primeros aceites de alumbrado se hacían con aceitunas y semillas. El cultivo del olivo se extendió

por todo el Mediterráneo hace 3.000 años y el aceite de oliva se utilizó ampliamente para la iluminación. Hace unos 3.500 años, las plantas de sésamo se cultivaban en Babilonia y Asiria, y el aceite de las semillas se quemaba. Los aceites de oliva y sésamo se quemaban en pequeñas lámparas, a veces con una mecha formada por un junco o una hebra de lino retorcida. En todo el mundo antiguo se han encontrado lámparas de piedra, terracota, metal, concha y otros materiales.

Los aceites animales eran más comunes en el norte de Europa, donde el aceite se obtenía del pescado y las ballenas. A principios del siglo XVIII, se descubrió que el aceite de cachalote era un excelente iluminante, y la caza de ballenas creció enormemente como consecuencia de ello. El aceite de ballena y las lámparas que lo quemaban eran comunes en la América colonial.

Con el tiempo, la ciencia de Antoine Lavoisier sobre el oxígeno y la combustión llegó al antiguo oficio de quemar aceite. En 1780, Ami Argand inventó una mecha y un quemador circulares y huecos, más luminosos y eficaces que las anteriores lámparas de aceite. La lámpara de Argand fue modificada en el siglo siguiente a su introducción, y más tarde se adaptó para su uso con gas de hulla cuando se necesitaba un quemador eficiente.

La grasa animal fue probablemente uno de los primeros combustibles utilizados para la iluminación, con una antigüedad sólo superada por la madera. Las evidencias de fuego controlado en los hogares aparecen hace unos 250.000 años, y no es difícil imaginar que los primeros humanos se dieran cuenta de que la grasa ardía mientras su carne se asaba. Las pinturas rupestres de Lascaux, realizadas en Francia hace 15.000 años, probablemente se crearon utilizando la iluminación de la grasa animal quemada en lámparas; se encontraron más de 100 lámparas de este tipo en la cueva.

El sebo, que es una grasa animal extraída y purificada, se ha utilizado para la iluminación desde los primeros tiempos de la civilización egipcia. Aunque inicialmente se quemaba en lámparas, se utilizó para fabricar velas durante casi 2.000 años. En Egipto se fabricaba una protocandela con el tallo del abundante junco empapado en grasa animal. Cuando se secaba, ardía con fuerza. Estas "velas de junco" se utilizaron en toda Europa, en algunos lugares hasta el siglo XIX.

En el siglo I d.C. surgieron evidencias de velas modernas en Roma. Estas velas se fabricaban con una mecha pequeña y una gruesa capa de sebo moldeada a mano. A principios de la Edad Media, las velas se fabricaban por vertido y, posteriormente, por inmersión, método que cambió poco en los siglos siguientes. Aunque también se

utilizaba la cera, las velas se empleaban casi exclusivamente con fines litúrgicos, ya que eran demasiado caras para la iluminación ordinaria.

En el siglo XIX, Michel Chevrueel realizó avances químicos que permitieron la producción de estearina, un derivado del sebo con el que se conseguían velas muy superiores. Mediante un proceso de fabricación de jabón, los químicos separaron la estearina del ácido oleico líquido del sebo. En 1830, Karl Reichenbach aisló una sustancia sólida cristalina del carbón que era estable y ardía con facilidad. La denominó parafina. A partir de 1860, la parafina se destiló del petróleo y se produjeron grandes cantidades, lo que permitió fabricar velas de alta calidad a bajo coste.

Iluminación a partir del siglo XIX

A partir de 1800 la iluminación pasará por infinidad de tecnologías.

La iluminación por gas de hulla

El "gas de hulla" o (Gas de coque), un complejo hidrocarburo producido por la destilación del carbón, revolucionó la iluminación de las zonas urbanas. La vela o la lámpara de aceite se sustituyeron por la llama luminosa del gas ardiendo que salía del extremo de un sinuoso laberinto de tuberías que iba desde la fábrica de gas y sus depósitos de almacenamiento, a través de las calles, y hasta el hogar, la iglesia, el teatro, la tienda y la oficina.

El gas de alumbrado se producía sometiendo el carbón a un calor considerable durante varias horas en un recipiente cerrado. El calor y la casi ausencia de oxígeno separaban el carbón en hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos. El gas se conducía y, tras enfriarse y condensarse, se lavaba y depuraba. A continuación, se bombeaba a los depósitos de almacenamiento.

El gas salía de estos tanques por tuberías subterráneas, normalmente siguiendo las calles principales, y se llevaba a los hogares y negocios, donde se medía y finalmente se conducía a los quemadores metálicos individuales. En 1858, el gran industrial británico del gas William Sugg patentó unos quemadores fabricados con el mineral esteatita o piedra de jabón. La esteatita, lo suficientemente blanda como para darle forma, era lo suficientemente refractaria a los efectos del calor y la corrosión.

Luces de queroseno en el siglo XIX

Lo que el alumbrado de gas fue para las zonas urbanas en el siglo XIX, el queroseno lo fue para las comunidades rurales. El queroseno, un hidrocarburo líquido descubierto y bautizado en 1854 por Abraham Gesner, se destilaba inicialmente a partir del carbón y del llamado "aceite de carbón". Tenía unas características ideales para la iluminación: No era explosivo, sino que ardía con una llama luminosa y sin humo.

Iluminación de arco

Desde 1800 se sabía que la luz podía producirse mediante un arco eléctrico entre varillas de carbón. Pero un arco no era práctico, ya que la fuente de electricidad en aquella época era la pila voltaica. En 1831, Michael Faraday descubrió la inducción electromagnética y logró producir electricidad directamente a partir del magnetismo. La noticia de los descubrimientos de Faraday se difundió rápidamente y, en 1844, ya se utilizaban generadores eléctricos comerciales para la galvanoplastia. En 1860, los faros de Inglaterra y Francia utilizaban luces de arco alimentadas por dínamos eléctricos.

En 1867, William Siemens señaló el camino de la más importante de las primeras máquinas generadoras de electricidad: la de Theophile Gramme. Sus dínamos eran mucho más eficaces que las máquinas anteriores y tenían una construcción sencilla que las hacía fiables y fáciles de mantener. Generaron grandes cantidades de energía eléctrica y renovaron los esfuerzos por mejorar las luces de arco.

Todas las luces de arco habían funcionado con corriente unidireccional y los carbones positivos y negativos se consumían de forma desigual. Se habían ideado elaborados mecanismos para mantener una separación constante del arco, pero limitaban la viabilidad de la iluminación por arco. En 1876, Paul Jablochkoff ideó una solución sorprendentemente sencilla: utilizar corriente alterna para que ambos carbones se consumieran al mismo ritmo.

Iluminación eléctrica incandescente

Los primeros trabajos sobre lámparas incandescentes datan de 1840 aproximadamente. Durante los 30 años siguientes, estas lámparas utilizaron la misma tecnología general: un iluminador de platino o carbono en un recipiente para controlar la atmósfera. La primera lámpara basada en el platino incandescente apareció en 1840, y el carbón incandescente se utilizó en 1845. Para fabricar una lámpara práctica, los

científicos tuvieron que aprender a manejar las propiedades del carbono y el platino a temperaturas de incandescencia.

Thomas Edison también trabajó en una lámpara incandescente. El avance clave realizado en 1879-1880 fue el reconocimiento de que una lámpara incandescente exitosa necesitaría tener un iluminante de alta resistencia y debía funcionar en un vacío más profundo que el que se alcanzaba rutinariamente en ese momento. En octubre de 1879, Edison construyó y probó una lámpara de este tipo. Esta primera lámpara tenía un "filamento" -palabra que Edison utilizó por primera vez- cortado de cartón y carbonizado al calor del blanco. Después de muchos experimentos, Edison se decidió por filamentos hechos de bambú para la versión comercial de su lámpara.

Lámparas de descarga

La descarga eléctrica luminosa del mercurio a baja presión se conocía desde principios del siglo XVIII. La primera aplicación a la iluminación fue la introducción de mercurio en la cámara de una lámpara de arco. Esta lámpara, y otras similares, producían la característica luz azul-verde de la descarga de mercurio a baja presión. En 1890, se disponía de lámparas de mercurio con una eficacia de entre 15 y 20 lúmenes/vatio. Aunque no eran adecuadas para la iluminación interior normal, se utilizaban en aplicaciones industriales y fotográficas.

En 1934, GEC Inglaterra (General Electric Company de Inglaterra) había producido una lámpara fluorescente de prueba: Producía una luz verde con una notable eficacia de 35 lúmenes/vatio. Esto impulsó un proyecto de desarrollo de lámparas fluorescentes en General Electric, en Cleveland. En abril de 1938, General Electric anunció la disponibilidad de la lámpara fluorescente. Las primeras lámparas estaban disponibles con fósforos que producían luz "cálida" y "fría", conocidas como lámparas "blancas" y "diurnas". La novedad de estas lámparas era la necesidad de un balasto eléctrico para su encendido y funcionamiento.

Iluminación por halogenuros metálicos

En 1894, Charles P. Steinmetz comenzó a trabajar en General Electric, en Schenectady (Nueva York). Uno de sus proyectos de investigación consistía en desarrollar una lámpara que utilizara una descarga de mercurio aumentada para que su color de luz fuera más aceptable. Steinmetz experimentó con los elementos halógenos y los metales. Descubrió que las sales metálicas en un arco de mercurio daban una

amplia gama de colores y no atacaban químicamente el tubo de arco de vidrio como lo harían los elementos aislados. Aunque se patentó en 1900, la lámpara de Steinmetz nunca pudo fabricarse de forma práctica y comercial.

Robert Coble, ingeniero cerámico de General Electric, desarrolló la almina policristalina en 1957. Tenía una transmitancia difusa de casi el 95 por ciento y un punto de fusión muy alto, por lo que podía utilizarse para contener plasma de sodio a altas presiones. Utilizando este nuevo material como tubo de arco, General Electric comenzó a vender lámparas de sodio de alta presión en 1965.

Iluminación de descarga de sodio

Los experimentos realizados en la década de 1920 demostraron que una descarga de sodio a baja presión podía utilizarse como fuente de luz de alta eficacia. A diferencia del mercurio, el sodio a altas temperaturas y presiones ataca al vidrio y al cuarzo, por lo que las primeras lámparas de sodio se limitaban a bajas temperaturas y presiones. Aunque eran muy eficaces -incluso las primeras lámparas proporcionaban 80 lúmenes/vatio-, su luz amarilla y monocromática limitaba su uso a la iluminación de áreas y carreteras.

Robert Coble, ingeniero cerámico de General Electric, desarrolló la almina policristalina en 1957. Tenía una transmitancia difusa de casi el 95 por ciento y un punto de fusión muy alto, por lo que podía utilizarse para contener plasma de sodio a altas presiones. Utilizando este nuevo material como tubo de arco, General Electric comenzó a vender lámparas de sodio de alta presión en 1965.

Tecnología actual LED (Light Emitting Diode- Diodo emisor de luz)

Los primeros efectos registrados del efecto del diodo emisor de luz se observaron a principios del siglo XX. Un ingeniero de radio británico llamado H J Round, que trabajaba para Marconi, realizó algunos experimentos con detectores de cristal. En aquella época, los detectores de radio eran uno de los principales factores limitantes de los primeros aparatos de radio inalámbricos. Era un ingeniero de gran talento y ayudó a avanzar en la ciencia de la radio de muchas maneras.

Los primeros detectores se hacían a menudo con cristales de lo que llamaríamos semiconductores. Se colocaba un hilo fino en la superficie y se hacía un diodo de contacto puntual. Se les llamaba "bigotes de gato" por razones obvias.

Al tratar de investigar los efectos y mejorar su rendimiento, Round hizo pasar una corriente por algunos de sus detectores. Observó que uno de ellos emitía luz cuando se le hacía pasar una corriente. Aunque no entendía el mecanismo del efecto, publicó sus hallazgos en 1907 en una revista de la época llamada *Electrical World*. En ella publicó:

“Señores: Durante una investigación sobre el paso asimétrico de la corriente a través de un contacto de carborundo y otras sustancias se observó un curioso fenómeno. Al aplicar un potencial de 10 voltios entre dos puntos de un cristal de carbono, el cristal emite una luz amarillenta. Sólo se encontraron uno o dos especímenes que dieran un brillo intenso con un voltaje tan bajo, pero con 11 voltios se pudo encontrar un gran número que brillaba. En algunos cristales sólo los bordes daban la luz y otros daban en cambio una luz amarilla, verde anaranjada o azul. En todos los casos probados el brillo parece provenir del polo negativo, apareciendo una chispa azul-verde brillante en el polo positivo. En un solo cristal, si se hace contacto cerca del centro con el polo negativo, y se pone en contacto el polo positivo en cualquier otro lugar, sólo una sección del cristal brillará y que la misma sección dondequiera que se coloque el polo positivo.

Parece haber alguna conexión entre el efecto anterior y el f.e.m. (fuerza electromotriz) producido por una unión de carborundo y otro conductor cuando se calienta por una corriente continua o alterna; pero la conexión puede ser sólo secundaria, ya que una explicación obvia del efecto f.e.m. es la termoeléctrica. El escritor estaría encantado de recibir referencias de cualquier informe publicado sobre una investigación de este fenómeno o de cualquier otro relacionado.”

Durante la Segunda Guerra Mundial, el radar se consideró un elemento fundamental. En consecuencia, se inició un gran desarrollo de dispositivos prácticos para el radar. Para ello se utilizó gran parte del trabajo de la ciencia de los materiales que se había llevado a cabo en las décadas de 1920 y 1930.

Como resultado de estos trabajos, se inventaron y desarrollaron nuevos diodos de contacto puntual. Estos diodos ofrecían un mayor rendimiento que los diodos de válvula termoiónica o de tubo de vacío. Como resultado de la investigación sobre los diodos semiconductores, la idea del diodo emisor de luz volvió a surgir en 1951. Esta vez el trabajo iba a tener más éxito, aunque tardó algunos años en completarse. Uno de los

equipos de investigación estaba dirigido por Kurt Lehovec. Solicitó una patente en 1952 para los diodos de carburo de silicio que emitían luz. Sin embargo, ésta era sólo la primera fase del trabajo necesario para la invención del LED.

Tras los trabajos de Kurt Lehovec, otros empezaron a trabajar en la tecnología LED. El trabajo duró muchos años y en él participaron varias empresas e investigadores. Incluso Shockley se involucró. El trabajo sobre la invención del LED llevó a muchas personas y se extendió durante muchos años.

Aunque los LED no se comercializaron hasta pasados varios años, varias personas hicieron algunos descubrimientos y mejoras importantes. El propio Lehovac investigó la introducción de diferentes impurezas para cambiar el color de la luz, haciendo combinaciones de azul, verde/amarillo y amarillo pálido.

También los investigadores que trabajaban en la RCA patentaron un LED verde en 1958. Todos estos desarrollos de los LEDs añadieron más a la tecnología de los LEDs, haciendo avanzar la tecnología dentro de la historia general de los LEDs.

Los primeros LED disponibles en el mercado empezaron a aparecer a finales y mediados de los años sesenta. Las primeras versiones de estos componentes electrónicos utilizaban un semiconductor fabricado con galio, arsénico y fósforo (GaAsP). Producían una luz roja y, aunque la eficacia de los dispositivos era baja (normalmente entre 1 y 10 mcd a 20mA), empezaron a utilizarse ampliamente como indicadores en los equipos.

Una de las primeras empresas en fabricar LEDs a cierta escala fue Monsanto. En realidad, Monsanto era una empresa que suministraba los materiales semiconductores en bruto. Su objetivo era trabajar con Hewlett Packard -entonces una empresa de equipos de prueba-, Monsanto suministraba el semiconductor y Hewlett Packard fabricaba los diodos. Sin embargo, la relación no funcionó y Monsanto acabó desarrollando los diodos por sí misma. [El nombre de Monsanto no se ve hoy en día. El negocio fue vendido en 1979 a General Instrument].

Una vez fabricados los dispositivos originales de GaAsP, el siguiente desarrollo fue el de los dispositivos de fosforo de galio. Los dispositivos de GaP no se utilizaron de forma generalizada porque la luz que producían estaba en el extremo más alejado del espectro rojo, donde la sensibilidad del ojo humano es baja, y aunque producían un alto rendimiento, la percepción humana era de una luz tenue.

Una de las siguientes etapas en la historia de los LED fue el desarrollo de los LED de alta luminosidad. A medida que se desarrollaban los LED, los niveles de luz aumentaban hasta el punto de que podían considerarse para aplicaciones ajenas a las simples lámparas indicadoras. En 1987, los diodos AlGaAs (arseniuro de aluminio y galio) de Hewlett Packard que se estaban produciendo eran lo suficientemente brillantes como para utilizarlos como componentes electrónicos en aplicaciones de iluminación. Al principio, estos diodos se utilizaban en la industria del automóvil, donde los LED rojos eran ideales para las luces de freno de los vehículos, y también para los semáforos. En este caso, el uso de los LED era especialmente interesante por su mayor fiabilidad respecto a las luces incandescentes que se utilizaban anteriormente.

Un año después de la introducción de los primeros LED de AlGaAs se fabricó otra variante, AlInGaP (fosfuro de aluminio e indio). Estos LEDs supusieron una mejora significativa con respecto a los anteriores diodos de AlGaAs al duplicar la potencia luminosa.

Más tarde, en 1993, HP comenzó a utilizar GaP (fosfuro de galio) para proporcionar LEDs verdes de alto rendimiento. También los desarrollos posteriores de estos componentes electrónicos permitieron la producción de lámparas naranjas de alto rendimiento. Estas lámparas eran ideales para su uso como indicadores de dirección en los coches; de nuevo, su fiabilidad a la hora de encenderse y apagarse, así como su eficiencia, demostraron ser una mejora importante.

Con el creciente uso de los LEDs como resultado de su alta eficiencia y muchas otras ventajas, la historia del LED no terminó - más inventos de LEDs estaban por venir. De hecho, sigue siendo una historia en marcha. Se están realizando nuevos desarrollos e invenciones y la tecnología LED sigue avanzando hacia nuevas áreas con el desarrollo de los LED orgánicos y su uso en la iluminación.

Los LED son ahora un componente electrónico bien establecido que se utiliza en muchos diseños de circuitos electrónicos: se utilizan como pequeños indicadores y para la iluminación, tanto doméstica como industrial. Su uso no hará más que aumentar con el paso del tiempo.

A día de hoy, los LED se emplean para iluminación, señalización, infoentretenimiento, iluminación agrícola...

3. La contaminación lumínica y sus efectos sobre el medio ambiente

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la iluminación, en concreto el alumbrado exterior, tiene como propiedades fundamentales: favorecer la seguridad, enfocar la atención a zonas de interés (cultural, comercial...), favorecer la fluidez del tránsito y tráfico de vehículos y viandantes, aumentar el horario de la actividad humana... No obstante, dichos beneficios esconden una problemática y unos efectos negativos sobre la biodiversidad que no han sido tomados en cuenta durante los últimos años, por desconocimiento o por falta de regulación y normativas en el mismo.

El objetivo para los ayuntamientos y fabricantes de iluminación, no es eliminar el alumbrado exterior de nuestras ciudades, sino conseguir crear un equilibrio en el que se mejore los objetivos (potenciando los beneficios del alumbrado público) y se minimicen los prejuicios que este alumbrado puede llegar a acarrear sobre nuestras vidas y el impacto que este está causando en el ecosistema.

Según el Informe para la consulta pública previa que realiza el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo del Gobierno de España sobre el Proyecto de Real Decreto por el que se actualiza el Reglamento de Eficiencia Energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones Técnicas Complementarias Marzo 2019, se puede definir la contaminación lumínica como: “la alteración de la oscuridad natural del medio nocturno producida por la emisión de luz artificial.

Según el Vocabulario Internacional de Iluminación de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) la contaminación lumínica es un término genérico que indica la suma total de todos los efectos adversos de la luz artificial.

Se trata de uno de los problemas ambientales que más se ha incrementado en los últimos tiempos, debido fundamentalmente al alumbrado nocturno de exteriores y con una localización asociada al medio urbano, pero con repercusiones de largo alcance.

Aunque la palabra contaminación pueda parecer demasiado agresiva para definir el efecto que produce en el entorno que nos rodea, lo cierto es que la luz artificial incontrolada que emiten las luminarias tiene una serie de impactos sobre nosotros y sobre todos los ecosistemas. Es una agresión en sí misma y, por tanto, debe ser tratada como tal.

La causa principal de este fenómeno es el alumbrado público, mal elegido, mal diseñado o instalado, en cualquiera de sus aspectos: urbano, vial, arquitectónico o

deportivo. Otras causas, como los carteles luminosos, las vallas publicitarias, los cañones láser, etc., también contribuyen decisivamente a este fenómeno.

La contaminación lumínica es un problema que afecta a muchos ámbitos y de muchas maneras, pero podemos decir que la problemática viene dada de varios factores fundamentales, entre ellos podemos destacar que existía un desconocimiento de la problemática generada, un escaso nivel de estudios al respecto, la falta de normas y reglamentos que regulasen dicha problemática y un mal diseño de las luminarias (que se diseñaban y producían partiendo de la tecnología existente, basando ese diseño en un enfoque funcional estético y comercial).

La contaminación lumínica es un problema, que en su conjunto puede producir sus impactos en los ecosistemas en diferentes ámbitos:

1. Problema energético y medioambiental.
2. Impactos en el cielo nocturno.
3. Comportamiento, calidad de vida y reproducción de los animales.
4. Impacto sobre el desarrollo de la flora autóctona.
5. Impacto sobre la actividad del ser humano.

En los siguientes apartados, se expondrá la naturaleza de dichos impactos y los efectos que estos producen.

4. Efectos de la iluminación exterior artificial sobre la biodiversidad

Se llevará a cabo un análisis acerca de la problemática, en definitiva, efectos adversos y consecuencias nocivas de la contaminación lumínica. Se expondrán punto por punto los principales. Para llevar a cabo este trabajo se procedió a realizar una búsqueda bibliográfica en internet y se analizaron las principales ofertas del mercado en materia de iluminación y respeto medioambiental y ecoeficiencia.

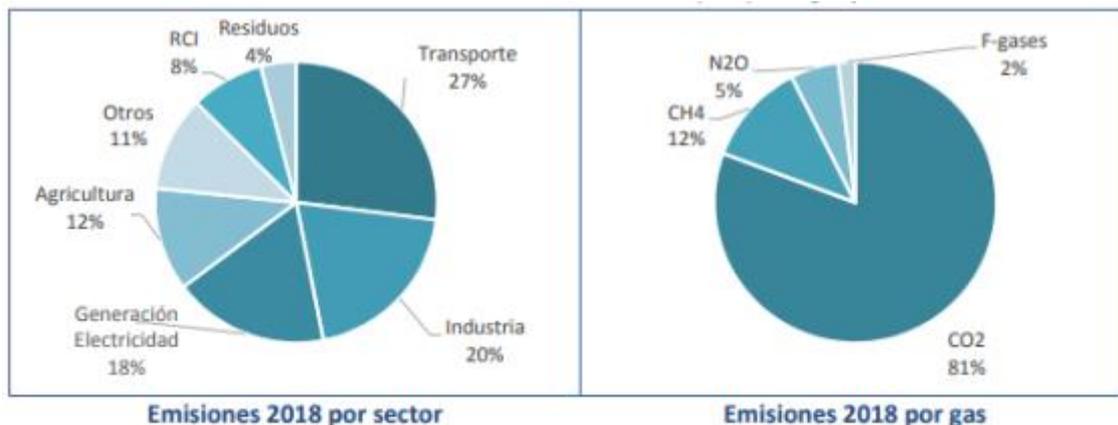
4.1 Efectos derivados de la producción de electricidad.

Según el informe de emisiones de CO₂ asociadas a la generación de electricidad en España, elaborado por la Red Eléctrica Española en Marzo de 2021, se expone la emisión de gases de efecto invernadero derivados de la producción eléctrica en España.

Los gases de efecto invernadero (en adelante, GEI) son fundamentalmente los considerados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI). Es decir, son el propio CO₂, el CH₄, el N₂O y los compuestos derivados del Fluor o gases fluorados (F-gases como el SF₆).

De las formas conocidas por el hombre para la producción eléctrica las que generan mayor impacto emitiendo mayores cantidades de GEI se generan por la combustión, por lo que son el CO₂ y el N₂O los predominantes. En la ilustración 3 podemos observar la distribución de emisiones brutas de GEI en 2018 por tipo de gas y sector.

Ilustración 3. Distribución emisiones por sector de actividad y tipo de gas



Emisiones GEI 2018 por sector de actividad y tipo de gas.

Fuente: Edición 2020 del Inventario Nacional de GEI 2018 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico).

“En el caso del sistema eléctrico español, las emisiones se han venido reduciendo como consecuencia de la mayor tasa de energías renovables y la reducción de la producción con carbón, pasando de cerca de 80 MtCO₂-eq en 2015, a aproximadamente 50 MtCO₂-eq en 2019.”

La incorporación de nuevas tecnologías en la producción de energías, así como el desarrollo de las actuales, nos conduce hacia una reducción en la emisión de este tipo de gases derivados de la producción de energía eléctrica. Cabe recordar que España es una nación cuya producción energética no es suficiente para abastecer la demanda actual y futura de su población y actividades.

Según los últimos datos de INE, España produce en torno al 26-27% de la energía que consume anualmente, importando en 2019 productos energéticos por valor de 45.000 millones de euros. Por lo que no somos capaces de valorar el impacto medioambiental y la cantidad de GEI que pueden llegar a ser emitidos por la producción de la energía en otros países.

Las reducciones del uso del carbón y la incorporación en el sistema productivo de electricidad español de las denominadas “energías renovables” han supuesto una reducción del 37,5% de las emisiones de GEI entre los años 2015 y 2019. Este dato no es del todo real, ya que la tendencia es una reducción anual del consumo de entre el 1 y el 3%, no obstante, es un dato que nos permite entender que se ha dado en los últimos años una reducción significativa en la emisión de GEI en España.

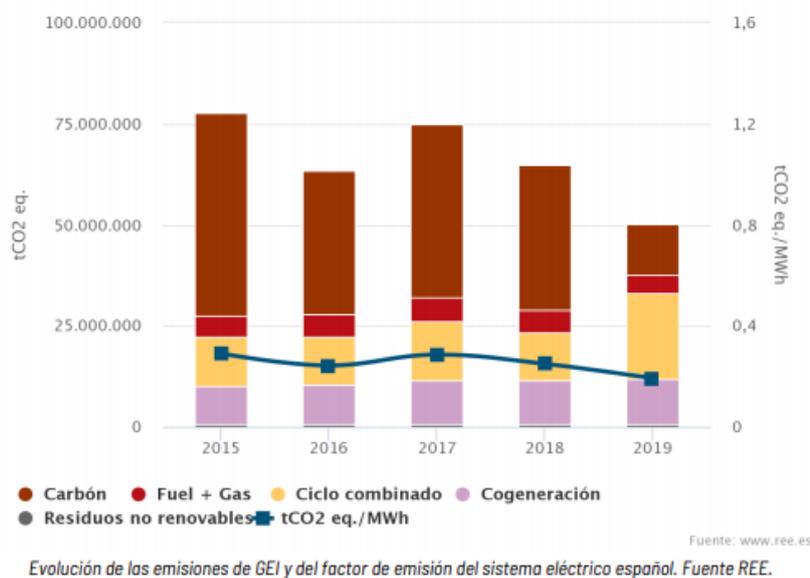
Tabla 1. Emisiones en territorio Peninsular

Sistema Peninsular	
Tecnología	Emisiones CO ₂ -eq (tCO ₂ -eq/MWh)
Central Térmica de Carbón	0,95
Central Térmica Ciclo Combinado (Gas Natural)	0,37
Central Térmica Fuel-Gas	0,77
Cogeneración	0,38
Residuos	0,24

Tabla 2. Emisiones en territorio no peninsular

Territorios no peninsulares	
Tecnología	Emisiones CO ₂ -eq (tCO ₂ -eq/MWh)
Central Térmica Ciclo Combinado (Gasóleo)	0,60
Central Térmica Ciclo Combinado (Gas Natural)	0,41
Central Térmica de Carbón	1,05
Motores Diesel (gasoil, fuel, gas natural)	0,68
Central Térmica Vapor	0,90
Turbina de Gas (Gasóleo)	1,12
Turbina de Gas (Gas Natural)	0,84
Cogeneración	0,38
Residuos	0,24

Ilustración 4 Emisiones GEI y factor de emisión SEE



Evolución de las emisiones de GEI y del factor de emisión del sistema eléctrico español. Fuente REE.

Resumiendo, el impacto mediambiental generado en España por la producción de electricidad destinada al consumo eléctrico, nos lleva a una media de 0,62 kilogramos de dióxido de carbono por kWh y 0,37 microgramos de residuos radiactivos por kWh. En España el gasto medio de electricidad corresponde a 5.721 kWh por habitante.

En cuanto al alumbrado público, España dispone de 8.849.839 puntos de luz que, con una potencia media de 156 W, representa un consumo de electricidad de 5.296 GWh/año para el conjunto de España.

Según el último estudio realizado al respecto “Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España (2017)”, España tiene

uno de los consumos energético más altos en cuanto a alumbrado público por habitante. En torno a 116 kWh/año por habitante. Estos datos han de ser estudiados con la perspectiva necesaria, sabiendo que se han producido pocas incorporaciones al censo de alumbrado público en ese periodo de tiempo y se han producido grandes cambios de esos mismos puntos de luz. Hay que entender que los datos de este estudio de 2017, (último de este tipo) recogen datos de 2004/2012, que han sido revisados en 2015 y 2017. En pleno auge de la tecnología led, en los periodos de tiempo donde los consumos y eficiencias de la tecnología eran mucho mejores que en el momento del estudio.

Tabla 3 Tabla Ratios de consumo por tamaño de municipio

Tamaño municipio	RATIOS IDAE			CENSO DE ESPAÑA		RESULTADOS	
	kWh/hab/a	W/PL	PL/1000 hab	Municipios	Población	GWh/a	PL
> 75.000 habitantes	81	182	108	88	20.399.147	1.653	2.209.135
40.001 a 75.000 hab	118	176	156	76	4.239.453	501	663.381
10.000 a 40.000 hab	133	163	209	557	10.702.913	1.429	2.237.499
< 10.000 hab	169	140	298	7.391	9.859.224	1.665	2.934.665
Conjunto España	116,1	161,1	178,0	8.112	45.200.737	5.247	8.044.680

Fuente: IDAE Elaboración propia 2015

Tabla 4 Tabla Ratios de consumo por Comunidad Autónoma

CC.AA	POBLAC 2016	Nº PL	MWh/a
Andalucía	8.388.107	1.584.697	952.839
Aragón	1.308.563	275.558	157.696
Baleares	1.107.220	204.089	125.136
Canarias	2.101.924	360.613	226.280
Cantabria	582.206	131.019	74.550
Castilla La Mancha	2.041.631	510.849	282.176
Castilla y León	2.447.519	586.482	324.575
Cataluña	7.522.596	1.392.053	841.918
Ceuta	84.519	10.152	6.927
Comunidad Valenciana	4.959.968	941.478	568.598
Extremadura	1.087.778	280.869	152.983
Galicia	2.718.525	587.417	338.158
Madrid	6.466.996	910.409	597.674
Melilla	86.026	10.333	7.050
Murcia	1.464.847	236.556	150.463
Navarra	640.647	158.385	86.735
País Vasco	2.189.534	418.648	251.641
Principado de Asturias	1.042.608	181.701	112.412
Rioja, La	315.794	68.531	38.718
TOTAL	46.557.008	8.849.839	5.296.530

Fuente: IDAE Elaboración propia 2017

Por todo esto, y solo estudiando el consumo energético dejando pasar por la falta de datos el efecto de la producción de dichas luminarias, su transporte, su instalación y

la gestión de los residuos generados por la industria completa, podemos afirmar que el impacto medioambiental ya sea directo o indirecto es verdaderamente grande.

4.2 Efectos de la contaminación lumínica sobre el cielo nocturno.

El ser humano ha ido desarrollando su actividad, y con ello las ciudades, y núcleos urbanos y suburbanos han ido creciendo. La incansable modernización y el desarrollo de estos núcleos de población y los servicios asociados que han ido localizándose en los mismos, han hecho que se produzcan efectos como la despoblación de muchas áreas, el éxodo rural... Esto ha llevado a un crecimiento desmedido de las grandes ciudades, como referentes y de sus entornos como núcleos urbanos o ciudades dormitorio subsidiarias de estas.

El desarrollo de estos grandes núcleos poblacionales ha traído consigo a la gestión desde los ayuntamientos, de nuevos sistemas de canalizaciones, red eléctrica, telefonía, sanidad, colegios... y alumbrado público.

En la ilustración 5 se puede observar el desarrollo de la ciudad Americana de Los Ángeles.

Ilustración 5 Evolución del desarrollo de la ciudad de Los Angeles



Fuente Google Images

Según la publicación CIE 126 (1997), el brillo del cielo nocturno es el que resulta de la reflexión de la radiación (visible o no visible) dispersada por los componentes de la atmósfera (moléculas de gas, aerosoles y partículas de materia) en la dirección de observación.

El brillo del cielo es el resultado de dos componentes distintos:

1. **El resplandor natural del cielo:** El componente natural del resplandor del cielo tiene cinco fuentes: la luz solar reflejada por la Luna, el débil resplandor del aire en la atmósfera superior que da lugar a una aurora residual de baja intensidad (también denominado airglow), la luz solar reflejada por el polvo interplanetario (luz zodiacal), la luz de las estrellas y la luz de fondo muy tenue de los objetos celestes difusos que aparecen como manchas de luz nebulosa, incluido el cinturón de la Vía Láctea. El resplandor natural del cielo está bien cuantificado y es globalmente mucho menor que el resplandor artificial. Sin Luna visible, el resplandor natural del cielo es menos de 1/10 del resplandor artificial en las afueras de una ciudad de tamaño medio; y es menos de 1/50 de lo que se observa desde el interior de una ciudad. Este tipo de brillos o resplandores, son los que marcan la actividad de los animales nocturnos. Dependiendo de las características estacionales del cielo, así como de la posición de la luna y los astros se regulan las actividades de dichos animales, apareamiento, hibernación, geolocalización, migración...
2. **Resplandor artificial del cielo:** es la parte del resplandor del cielo que se atribuye a las fuentes de radiación artificial (las luminarias de alumbrado público principalmente), sobretodo la radiación emitida directamente hacia arriba, pero también, en menor medida, la radiación reflejada por la superficie de la Tierra.

Es el resplandor que ilumina el cielo y que afecta fuertemente a los observadores del cielo con fines científicos, recreativos o turísticos, ya que reduce sustancialmente la capacidad de ver las estrellas y también molesta a algunos seres vivos. Es el resultado de la luz proyectada hacia arriba y dispersada o desviada hacia la superficie de la Tierra, y también del deslumbramiento. Un criterio intuitivo para evaluar el mayor o menor impacto de la contaminación lumínica en un lugar determinado es mirar hacia arriba: cuantas menos estrellas se puedan observar a simple vista, más grave es la contaminación lumínica.

No se debe de descuidar la luz irradiada indirectamente hacia arriba, o aquella que provenga de la reflexión en superficies u objetos ya que es imposible anular completamente este efecto (cuya única solución sería apagar todos los sistemas de luz artificial). Sin embargo, este efecto es generalmente menor que el de la radiación directa que apunta por encima de la horizontal.

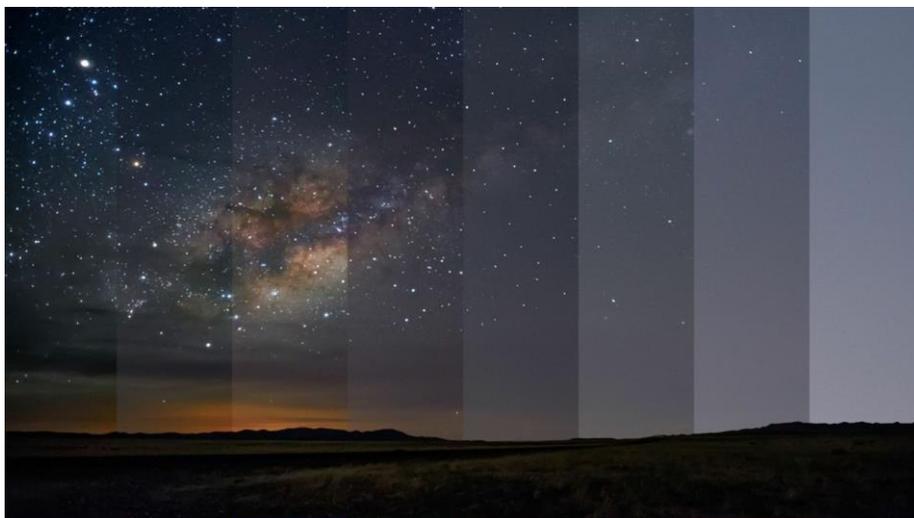
Este fenómeno es muy variable y depende de:

- 1- la cantidad de luz dirigida hacia el cielo;
- 2- la cantidad de gas y polvo en la atmósfera
- 3- las condiciones meteorológicas inmediatas;
- 4- la dirección desde la que se ve.

En malas condiciones atmosféricas, o en presencia de contaminación atmosférica, hay más partículas en la atmósfera y, por tanto, más luz se dispersa o vuelve a la superficie de la tierra.

Cuanto más brillante es el cielo, menos transparente es la atmósfera, y por tanto, más visible es.

Ilustración 6 Visibilidad del cielo según transparencia de la atmósfera



Fuente: Google Images

En la ilustración 6, se puede observar la influencia de la iluminación artificial sobre el brillo natural del cielo.

El resplandor artificial del cielo es una gran preocupación para los observadores ocasionales del cielo y los astrónomos, porque disminuye su capacidad de observar los cuerpos celestes, reduciendo en gran medida el número de estrellas detectables a simple vista.

Los astrónomos suelen preferir las noches oscuras con aire seco y claro para sus observaciones. Aumenta el brillo de las partes oscuras del cielo, reduciendo el contraste de las estrellas u otros objetos celestes contra el fondo oscuro del cielo. Y hace casi imposible observar los objetos del cielo profundo (nebulosas, galaxias y cúmulos de estrellas).

La influencia de la iluminación artificial en un núcleo suburbano podría parecer casi despreciable, pero sus efectos son mucho mayores de lo que pensamos.

Tanto la iluminación superior respecto de la horizontal de la luminaria, como el deslumbramiento, así como la reflexión de la luz proyectada por las superficies a las cuales se proyecta la luz pueden tener una influencia radical en un paisaje, así como en nuestra capacidad para percibirlo.

Ilustración 7 Efectos de la iluminación exterior artificial sobre el cielo nocturno.



En astronomía, el punto del cielo situado verticalmente por encima de la cabeza del observador se denomina cenit. Debido a la contaminación lumínica, el cielo en la región cenital de una zona suburbana es de 5 a 10 veces más brillante que en una región protegida de la contaminación lumínica y unas 50 veces más brillante cuando se ve desde el centro de la ciudad. Es importante tener en cuenta que es en la región cenital donde menos se notan los efectos de la contaminación lumínica, que aumentan a medida que nos acercamos al horizonte. El punto de la esfera celeste opuesto al cenit se llama nadir. El nadir es siempre invisible para un observador terrestre.

¿Cómo se puede calcular el brillo del cielo?

La luminotecnia y la astronomía utilizan los mismos conceptos de fotometría. Los fundamentos son los mismos, pero las convenciones y las unidades prácticas difieren, aunque, por supuesto, pueden relacionarse entre sí.

En luminotecnia, las unidades fotométricas suelen estar relacionadas con la visión fotópica: el lumen (símbolo: lm), unidad de flujo luminoso; el lux (lx), unidad de iluminancia o de potencia luminosa; la candela (cd), unidad de intensidad luminosa; y la candela por metro cuadrado (cd/m²), unidad de luminancia.

En el centro de una ciudad, el cenit puede ser de 25 a 50 veces más brillante que el brillo del cielo natural. Las unidades fotométricas se basan en la curva de visibilidad

relativa (visión fotópica), donde el ojo humano muestra la máxima sensibilidad a la luz de longitud de onda $\lambda=555$ nm.

En astronomía, el brillo de los objetos celestes se expresa mediante su magnitud, ya sea para objetos puntuales (estrellas), para objetos grandes y definidos (Sol, Luna) o incluso para objetos difusos (nebulosas, galaxias). En el caso de la magnitud visual aparente, dicha medida traduce el brillo con el que se presentan al ojo, o a un sistema detector que simula la sensibilidad espectral del ojo humano.

Se distingue entre la magnitud visual, la magnitud en bandas específicas de longitud de onda y la magnitud que cubre todo el espectro emitido. En este documento, y en relación con la contaminación lumínica, utilizaremos la palabra magnitud para designar la magnitud visual aparente.

La escala de magnitudes es esencialmente una escala logarítmica, donde una diferencia de 5 magnitudes corresponde a un cociente de flujos igual a 100. Según la definición de magnitud, cuanto más brillante es una estrella, menor es su magnitud (puede tomar valores de magnitud negativos en casos de mayor brillo). Por ejemplo, las 21 estrellas más brillantes del cielo tienen magnitudes entre -1,5 y 1,7 (la magnitud del Sol vale -26,7). Las estrellas más débiles que podemos ver (a simple vista) desde un lugar oscuro son de magnitud 6.

La fotometría astronómica se basa en el flujo (total o en un rango específico de longitudes de onda) medido por un sistema de detección apropiado. A efectos prácticos de la contaminación lumínica, nos interesa principalmente la banda visible (aproximadamente de 390 nm a 700 nm).

¿Cómo se puede medir directamente el brillo del cielo

La influencia del brillo artificial del cielo (consecuencia de la contaminación lumínica) se calcula comparando la luminancia medida, en la región cenital, con la luminancia del cielo en condiciones de observación prácticamente ideales (magnitud 21,6 por arcsec^2), que se tendría en ausencia de contaminación lumínica. El valor más representativo es el cociente del brillo global del cielo (b_a) por su brillo natural (b_a/b_n), ambos en la región cenital.

El brillo global del cielo puede medirse cómodamente con el dispositivo SQM (Sky Quality Meter). La lectura viene indicada directamente en magnitud por segundo cuadrado de arco ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Dado que se conoce el brillo natural medio del cielo

(mag 21,6 por arcsec²), el impacto artificial se evalúa por la diferencia, teniendo en cuenta que cada unidad de diferencia corresponde a un factor de 2,512. Por ello es un efecto que puede medirse y se puede cuantificar.

La Escala de Cielo Oscuro de Bortle es una escala numérica de nueve niveles que mide el brillo del cielo nocturno y de las estrellas brillo (magnitud límite a simple vista y estelar) de un lugar determinado. Cuantifica la observabilidad de los objetos celestes (entidades físicas significativas de origen natural, asociaciones o estructuras que la ciencia actual ha demostrado que existen en el espacio exterior) y la interferencia causadas por la contaminación lumínica y el resplandor del cielo (iluminación a gran escala del cielo o de partes del cielo por la noche).

Tabla 4 Escalas de brillo según la magnitud del color

Color Magnitude	Bortle Class	Sky Brightness mag/arcsec ²	Artifi./Natural
7.6 - 8.0	1	>21.90	<0.01
7.1 - 7.5	2	21.90 - 21.50	0.01 - 0.11
6.6 - 7.0	3	21.50 - 21.30	0.11 - 0.33
6.3 - 6.5	4	21.30 - 20.80	0.33 - 1.00
6.1 - 6.3	4.5	20.80 - 20.10	1.00 - 3.00
5.6 - 6.0	5	21.1 - 19.10	3.00 - 9.00
5.0 - 5.5	6,7	19.1 - 18.00	9.00 - 27.0
<4.5	8,9	<18.00	>27.0

Ilustración 8 Rangos de visibilidad del cielo por zonas



Tabla 6 Escala de Bortle

Clase	Título	Color	Mag límite	Descripción
1	Ubicación con cielo oscuro excelente	Negro	7.6 – 8.0	La Luz zodiacal, gegenschein, y banda zodiacal son visibles; M33 es visible a simple vista sin problemas; las regiones de la Vía Láctea de las constelaciones de Escorpión y Sagitario proyectan sombras en el suelo; Júpiter y Venus afectan a la adaptación a la oscuridad del ojo, y es imposible ver los alrededores.
2	Ubicación con cielo oscuro típica	Gris	7.1 – 7.5	M33 es visible a simple vista; La Vía Láctea de verano aparece muy compleja; la luz zodiacal se ve amarillenta y proyecta sombras al alba y al crepúsculo; las nubes únicamente son visibles como zonas oscuras sin estrellas; los alrededores se ven visibles débilmente recortados contra el cielo; muchos cúmulos globulares del Catálogo Messier son aún visibles a simple vista.
3	Cielo rural	Azul	6.6 – 7.0	Se aprecia algo de contaminación lumínica en el horizonte, donde las nubes aparecen iluminadas; siguen apareciendo oscuras en la parte superior del cielo; la Vía Láctea sigue apareciendo compleja; M15, M4, M5, M22 son visibles a simple vista; M33 es fácil de ver con visión desviada; la luz zodiacal aparece impresionante en primavera y otoño y aún puede apreciarse su color; los alrededores son difíciles de ver.
4	Transición entre cielo rural y periurbano	Verde	6.1 – 6.5	Varias cúpulas de polución lumínica son visibles en varias direcciones sobre el horizonte; la luz zodiacal es aún visible, pero no tan impresionante, llegando hasta el cenit en primavera. La Vía Láctea sigue siendo espectacular, pero empieza a perder detalles. M33 es difícil de ver incluso con visión desviada y sólo a >55° de altura. Las nubes se ven como en el caso anterior, y es fácil ver los alrededores, incluso en la distancia.
5	Cielo periurbano	Amarillo	5.6 – 6.0	La luz zodiacal sólo es débilmente visible y en las mejores noches de primavera y otoño; la Vía Láctea aparece muy débil o invisible cerca del horizonte y en su punto más alto aparece "desgastada"; se ven fuentes de luz en todas o casi todas las direcciones; las nubes aparecen considerablemente más brillantes que el cielo.
6	Cielo periurbano brillante	Naranja	5.1 – 5.5	La luz zodiacal es invisible. La Vía Láctea sólo es visible en el cenit; el cielo hasta una altura de 35° del horizonte aparece gris blanquecino; las nubes aparecen brillantes en cualquier parte del cielo. M33 sólo es visible con al menos binoculares, y Andrómeda es débilmente visible a simple vista.
7	Transición entre cielo periurbano y urbano	Rosa	5.0 en el mejor caso	Todo el cielo tiene un tono gris blanquecino, y pueden apreciarse fuentes de luz en todas direcciones. La Vía Láctea es invisible; la Galaxia de Andrómeda y el Pesebre pueden verse -aunque mal- a simple vista; incluso con telescopios de apertura moderada, los objetos Messier más brillantes aparecen únicamente como las sombras de lo que son en lugares mucho mejores.
8	Cielo urbano	Blanco	4.5 en el mejor caso	El cielo brilla blanco o naranja, y su luz permite leer; sólo los observadores experimentados pueden ver la Galaxia de Andrómeda y el Pesebre en noches propicias; incluso al telescopio sólo pueden verse objetos Messier brillantes; las estrellas que forman asterismos familiares de las constelaciones pueden ser invisibles o en el mejor de los casos débilmente visibles.
9	Cielo de centro de ciudad	Blanco	4.0 en el mejor de los casos	El cielo brilla intensamente y muchas estrellas, así como constelaciones formadas por estrellas débiles, son invisibles a excepción de las Pléyades, no hay ningún objeto Messier visible a simple vista; los únicos objetos que pueden verse todavía en condiciones son la Luna, los planetas, unos pocos cúmulos estelares brillantes, y poco más.

4.3 Efectos de la iluminación exterior artificial sobre la fauna y la flora.

La visión es una señal fundamental para que los animales salvajes se orienten en su entorno, encuentren comida, eviten la depredación y se comuniquen. Una consideración importante en la gestión de la luz artificial para la fauna salvaje es

comprender cómo perciben la luz los animales, tanto en términos de lo que ve el ojo como de la perspectiva de visión del animal.

Los animales perciben la luz de forma diferente a los humanos. La mayoría de los animales son sensibles a la luz ultravioleta (UV)/azul, mientras que algunos pájaros son sensibles a las longitudes de onda más largas, amarillo/naranja, y algunas serpientes pueden detectar las longitudes de onda infrarrojas. Entender la sensibilidad de la fauna silvestre a las diferentes longitudes de onda de la luz es fundamental para evaluar los efectos potenciales de la luz artificial sobre la fauna.

La forma de describir y medir la luz se ha centrado tradicionalmente en la visión humana. Para la fauna silvestre, es fundamental entender cómo se define, describe y mide la luz y considerar la luz desde el punto de vista de la fauna silvestre. y medir la luz y considerar la luz desde la perspectiva de la vida silvestre.

La luz blanca se compone de longitudes de onda de todo el espectro visible. Una curva de potencia proporciona una representación de la presencia relativa de cada longitud de onda emitida por una fuente de luz. Un diseño de iluminación debe incluir curvas de distribución de la potencia espectral para todos los tipos de iluminación previstos, ya que esto proporcionará información sobre la cantidad relativa de luz emitida en las longitudes de onda a las que la fauna es más susceptible.

Es importante destacar que la influencia que un estímulo externo tiene sobre un miembro de un ecosistema, afectando a sus costumbres, población, orientación, fotosíntesis... repercute significativamente sobre el ecosistema creando un desequilibrio en la cadena trófica. Aunque pueda parecer insignificante, un descenso del número de insectos voladores en un ecosistema puede suponer una reducción significativa de la producción de semillas y frutos de muchas plantas ya que son ellos los que se encargan de la polinización, lo que supondría un descenso (por falta de alimento) en el número de aves y herbívoros del ecosistema, lo que reduciría también el alimento de los carnívoros y carroñeros. La naturaleza es capaz de reequilibrar este tipo de desequilibrios, pero no es un ciclo rápido y suele coincidir con la desaparición de una o varias especies, un cambio en la Biosfera y la inclusión de nuevas especies que se adaptan mejor a las nuevas características del ecosistema.

Influencia sobre aves

En concreto, las aves pueden categorizarse según su forma de vida en:

1. Sedentarias: Son aves que no realizan movimientos durante las diferentes épocas del año ya que se adaptan bien a las diferentes características estacionales de su entorno.
2. Aves migratorias: Son aves que se anticipan a los cambios estacionales de sus entornos y cambian de lugar para beneficiarse de los recursos tróficos de los nuevos entornos. Estos desplazamientos son periódicos y predecibles, suelen coincidir con los descensos de la temperatura, reducción del alimento, periodo de reproducción y cria...

El efecto sobre las aves migratorias es significativamente mayor que en las aves sedentarias ya que la iluminación exterior artificial supone un estímulo para este tipo de aves.

En el caso concreto de las aves migratorias, lo primero es indicar que no todos los efectos de la iluminación exterior artificial son perjudiciales para estos tipos de aves, ya que la iluminación nocturna de las zonas de alimentación de las aves costeras migratorias, puede beneficiar a las aves al permitirles mayores oportunidades visuales de forrajeo, y alimento. Como explicaremos más adelante, muchos insectos son atraídos por los contrastes de temperaturas que una luminaria ofrece durante la noche lo que para muchas aves supone una concentración de alimento en un punto de elevada visibilidad. Sin embargo, cuando se iluminan artificialmente los dormideros nocturnos, las aves pueden verse desplazadas, reduciendo potencialmente su abundancia local si el coste energético de viajar entre los dormideros nocturnos y los lugares de alimentación es demasiado grande.

La iluminación artificial también podría actuar como una trampa ecológica al atraer a las aves migratorias a zonas de alimentación con mayor riesgo de depredación. En general, el efecto de la luz artificial en las aves migratorias está poco estudiado y, por consiguiente, cualquier evaluación debería adoptar el principio de precaución y gestionar los posibles efectos de la luz a menos que se demuestre lo contrario.

La luz artificial puede desorientar a las aves en vuelo, afectar a la selección de las escalas y provocar su muerte por colisión con infraestructuras. Las aves pueden morir de hambre como resultado de la interrupción de la búsqueda de alimento, lo que dificulta su capacidad para prepararse para la cría o la migración. Sin embargo, la luz artificial

puede ayudar a algunas especies, especialmente a las aves costeras que se alimentan de noche, ya que pueden tener un mayor acceso a los alimentos.

La mayoría de los estudios se limitan a la función de la visión en la búsqueda de alimento y son muy pocos los estudios que se centran en la fisiología de los ojos de las aves costeras o su respuesta a las diferentes longitudes de onda de la luz.

Se sabe que las aves en general se sienten atraídas y desorientadas por las luces artificiales. Esto podría ser el resultado de estar cegados por la intensidad de la luz que blanquea los pigmentos visuales y, por tanto, no ver los detalles visuales o la interferencia con la brújula magnética utilizada por las aves durante la migración. La atracción por la iluminación artificial nocturna convencional puede acarrear otras consecuencias adversas como la reducción de las reservas de combustible, el retraso de la migración, el aumento de la posibilidad de colisión y, por tanto, de lesiones y muerte.

La desorientación radical de un grupo migratorio de aves, que llegue a un ecosistema donde pueda pasar a ser una especie dominante, por la falta de depredadores, la abundancia de alimento, y un clima favorable, puede llegar a cambiar sus costumbres migratorias y al no recibir el estímulo habitual que marca su migración, podría llegar a convertirse en un ave sedentaria de su nuevo hábitat. Afectando entonces a dos ecosistemas, primero al que ha llegado y segundo en el que debería de estar (ya que puede suponer un descenso de la población de su hábitat regular).

Influencia sobre tortugas marinas.

La contaminación lumínica fue identificada como una amenaza de alto riesgo en el Plan de Recuperación de las Tortugas Marinas en Australia (2017) porque la luz artificial puede interrumpir comportamientos críticos como la orientación de los adultos que anidan y las crías, la búsqueda del mar y la dispersión, y puede reducir la viabilidad reproductiva de las poblaciones de tortugas. Una acción clave identificada en el Plan de Recuperación fue el desarrollo de directrices para la gestión de la contaminación lumínica en zonas adyacentes al hábitat biológicamente sensible de las tortugas.

Ilustración 8 Tortuga marina



Fuente: National Geographic

El efecto de la luz artificial en el comportamiento de las tortugas ha sido reconocido desde 1911 y desde entonces se ha llevado a cabo un importante número de investigaciones sobre cómo afecta la luz a las tortugas y su efecto en poblaciones de tortugas. El aumento global de la contaminación lumínica por la urbanización y el desarrollo costero es especialmente preocupante para las tortugas marinas, ya que su importante de anidación suele coincidir con zonas de desarrollo urbano e industrial a gran escala que tienen el potencial de emitir una gran cantidad de luz, incluyendo la luz directa, la luz reflejada, el resplandor del cielo y llamaradas de gas.

Las zonas de nidificación en la plataforma noroeste de Australia Occidental y a lo largo de la de Australia Occidental y a lo largo de la costa sudoriental de Queensland.

Es probable que la luz afecte a las tortugas si puede verse desde la playa de anidación, la costa o las aguas adyacentes. Las hembras adultas pueden ser disuadidas de anidar cuando la luz artificial es visible en una playa de anidación. Las crías pueden desorientarse y ser incapaces de encontrar el mar o dispersarse con éxito hacia el océano abierto. Se ha observado el efecto de la luz en el comportamiento de las tortugas desde luces situadas a una distancia de hasta 18 km.

Los aspectos físicos de la luz que más afectan a las tortugas son la intensidad, el color (longitud de onda) y la elevación sobre la playa. La gestión de estos aspectos ayudará a reducir la amenaza de la luz artificial.

Influencia sobre los insectos:

Los insectos son animales encargados de realizar infinitas funciones sobre sus ecosistemas, son los encargados de polinizar, la eliminación de la suciedad (materia orgánica ya sea desperdicios o materia orgánica muerta), son una fuente de alimento para muchas especies y muchas culturas del ser humano y el parasitismo que ayuda a controlar las poblaciones de especies.

Ilustración 9 Atracción de los insectos a proyectores de alta potencia.



Fuente: Google Images

El ciclo natural de la vida en cualquier ecosistema depende en gran medida a la influencia de los insectos en el mismo.

La iluminación exterior para muchos de ellos supone un estímulo, ya sea porque supone una fuente de atracción lumínica o calórica, donde descansar o reproducirse. Que la iluminación exterior suponga un estímulo para este tipo de seres vivos afecta en gran medida a la población de insectos, ya que se congregan sobre la fuente de luz (o fuente de temperatura) siendo un riesgo por las elevadas temperaturas y por la aparición de depredadores, que encuentran grandes cantidades de insectos en un mismo lugar.

En casos específicos, por ejemplo, el caso de la luciérnaga, la luz artificial impide su reproducción ya que en su proceso reproductivo se produce una comunicación por medio de señales luminosas de baja intensidad que no son capaces de atravesar el velo generado por la luz artificial.

Además de afectar a la fauna y la flora, pues son los insectos los encargados de realizar la polinización, y estos son una parte esencial de la cadena trófica, un descenso radical en su población supone menor alimento para sus depredadores y este un descenso en los depredadores de los insectívoros, y así sucesivamente.

Efectos sobre la flora:

La flora, específicamente, se ve afectada de la misma manera ya que puede llegar a modificar sus ritmos de floración, sus capacidades fotosintéticas... Pero el efecto no suele ser representativo. Los animales son seres que poseen la capacidad de moverse y reaccionar ante estímulos. Este movimiento es el que puede llegar a verse afectado. Es el animal el que se siente atraído por un estímulo exterior artificial.

Sin embargo, en el caso específico de la flora, esta no se ve tan afectada ya que la incidencia de la iluminación exterior es muy reducida sobre la población total, y en algunos casos es hasta beneficiosa como se ha demostrado en el conocido sector de "Agricultural Lighting", donde son elementos emisores de luz artificiales quienes ofrecen la mejor receta lumínica para el desarrollo específico de una especie.

4.4 Efectos de la iluminación exterior artificial sobre el ser humano.

Como se ha comentado con anterioridad en el progreso y evolución a lo largo de la historia ha tenido lugar sobre ciclos humanos periódicos estables en el tiempo. El ciclo asociado a la noche y día supone el principal ciclo que regula la actividad del hombre, sin embargo, no es el único ciclo que influye en la vida del ser humano. El ciclo mensual lunar y el de las estaciones derivado del movimiento terrestre de traslación son ritmos que, aunque en menor medida que el ritmo circadiano, influyen en la vida del ser humano.

Con el desarrollo de la tecnología y la actividad industrial, la actividad humana se ha ido desarraigando de estos ciclos, haciéndose independiente, de manera que las fábricas podían continuar produciendo por la noche para aumentar la productividad. Son numerosos los estudios que evidencian los efectos nocivos de la alteración de los ritmos circadianos. Pero una iluminación inadecuada no solo tiene efectos sobre los ritmos circadianos. A continuación se expondrán los principales daños que puede desencadenar la iluminación.

A grandes rasgos la energía lumínica puede producir tres grandes efectos en el ser humano que (no tienen por qué ser nocivos) como son¹:

1. Efectos fotoquímicos: son aquellos que producen los fenómenos necesarios que dan lugar a la visión, la producción de hormonas como la melatonina para establecer un ritmo circadiano, o la producción de radicales libres como responsables de patologías dermatológicas o retinianas.
2. Efectos fototérmicos: la elevación de la temperatura secundaria a energía lumínica puede dar lugar a situaciones de hipertermia, un estado procoagulante que favorezca el desarrollo de eventos trombóticos y en casos extremos puede redundar en ablación térmica de los tejidos.
3. Efectos fotodisruptivos: que tienen como resultado final la ruptura y dehiscencia de los tejidos.

Estas formas e interacciones de la energía lumínica en el organismo han sido objeto de aplicaciones terapéuticas, adecuadamente controladas.

Actualmente existe una tendencia a usar tecnología lumínica LED en contraposición a la anterior tecnología de iluminación, por las ventajas que esta presenta no sólo en cuanto a efectos sobre la luminancia y el ahorro de coste energético, sino también porque la tecnología LED tiene menor impacto sobre el medioambiente y el organismo ya que carece de emisión en las bandas UV e IR del espectro óptico, no contienen mercurio, y son menos proclives a romperse. Además, permiten la eficiencia lumínica y la regulación del haz de luz.

Sin embargo, la luz LED produce luz blanca a partir de luz azul, siendo el espectro de la luz azul la que más efectos nocivos produce en la salud humana pues es esta región del espectro la que más alteraciones se han descrito sobre el ritmo circadiano. Por otro lado, la luz LED produce unas luminancias muy elevadas, que aunque se encuentran reguladas por las normativas EN 12464 y EN 13201 no están exentas de efectos perniciosos sobre la salud humana, y posibles efectos negativos como el deslumbramiento con posibles efectos fatales en lo que a seguridad vial se refiere. ²

¹ Grupo de trabajo del Comité Español de Iluminación sobre los posibles riesgos de la iluminación LED. *“Posible Riesgos de la iluminación LED para la Salud”*.

² Grupo de trabajo del Comité Español de Iluminación sobre los posibles riesgos de la iluminación LED. *“Posible Riesgos de la iluminación LED para la Salud”*.

La disrupción circadiana o la crono disrupción se entiende como la alteración del ritmo circadiano con las subsecuentes implicaciones negativas para la salud del individuo. Estos efectos cada vez son más habituales debido a que los hábitos de vida que cada vez son más nocturnos, ya sea por motivos laborales o por mero ocio, donde la noche está excesivamente iluminada y durante el día permanecemos trabajando en instalaciones iluminadas inadecuadamente. Esta situación contribuye a generar la disrupción circadiana, llegando incluso a producir una asincronía total con las implicaciones que esto puede tener sobre la salud.

Son numerosos los estudios científicos que evidencian asociación entre la alteración del ritmo circadiano y patologías y síndromes entre las que se encuentran: síndrome metabólico, las enfermedades cardiovasculares, alteraciones de la cognición, trastornos afectivos, así como alteración de las respuestas terapéuticas de algunos fármacos con fines médicos.

El ojo es el principal órgano relacionado con la luz, pues es el que permite traducir la energía lumínica en impulsos electroquímicos que sean interpretados por la corteza cerebral occipital para la formación de la imagen en el cerebro. Es por ello por lo que el ojo y sus componentes son los principales afectados en una iluminación no óptima. Entre los principales efectos adversos como la retinopatía fotoquímica por exposición a la luz intensa que aparece en personas con exposiciones prolongadas a una intensidad lumínica elevada.

Se han descrito otras patologías de la retina como la retinopatía fotoquímica asociada con el haz de luz azul, pues es la que más afecta en un primer momento al epitelio pigmentario retiniano, que desencadena daños celulares por efectos oxidativos por la producción de radicales libres altamente reactivos. El riesgo de padecer esta patología aparece con más facilidad en aquellas personas que por cualquier motivo carecen de cristalino, que actúa como filtro espectral. Actualmente está en discusión el papel de este tipo de energía con el desarrollo de una patología muy prevalente en personas de la tercera edad, que supone uno de los principales motivos de ceguera en este rango de edad como es la Degeneración Macular Asociada a la Edad (DMAE)³.

³ Grupo de trabajo del Comité Español de Iluminación sobre los posibles riesgos de la iluminación LED. *“Posible Riesgos de la iluminación LED para la Salud”*.

5. Malas actuaciones en iluminación.

Es preciso hablar de los procesos que, sin ser causas de desarrollo de una enfermedad en sí misma en el individuo, puede poner en situación de peligro que sufra los efectos nocivos de una iluminación inadecuada como son el deslumbramiento, o el mareo que en el contexto de seguridad vial pueden suponer el desarrollo de un accidente con las implicaciones humanas y económicas que ello conlleva.

5.1. Deslumbramiento (Luz deslumbrante)

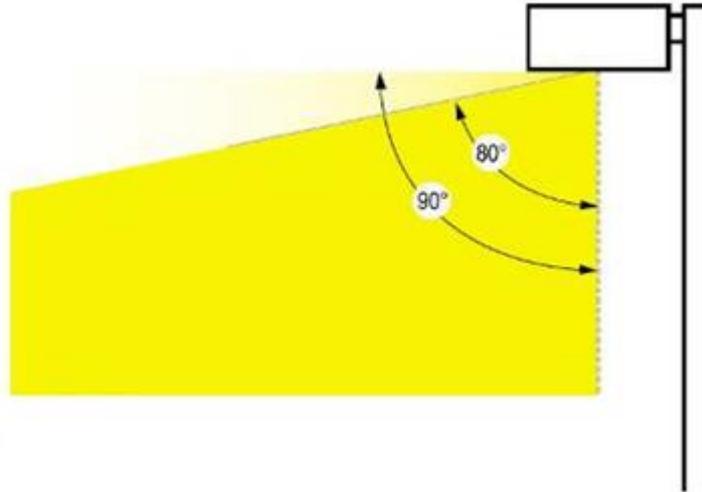
El deslumbramiento puede definirse como la luz incidente que, debido a sus atributos cuantitativos, direccionales o espectrales en un contexto determinado, da lugar a incomodidad, molestia, distracción (deslumbramiento incómodo) o a una reducción de la capacidad de ver información esencial (deslumbramiento incapacitante).

Esta luz molesta puede ser el resultado de una luz dispersa o mal dirigida, de luminarias deficientes, de fuentes directas y deslumbrantes y de la luz intrusa resultante de la luz dispersa o pérdida.

El deslumbramiento por inutilización se mide mediante el incremento del umbral (TI) sólo en las zonas en las que se calculan las luminancias, normalmente carreteras fuera del perímetro urbano; este tipo de deslumbramiento depende en gran medida del tipo de luminarias, lámparas, características del suelo y situación geométrica. Por ejemplo, las lámparas de vapor de sodio de alta presión y los tubos fluorescentes se consideran normalmente lámparas de baja luminancia. (6) Para estas lámparas y las luminarias asociadas, la normativa prevé normalmente un IT más elevado.

Para controlar el deslumbramiento, la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) ha desarrollado las clasificaciones CUT OFF que limitan los valores de intensidad en dos zonas con respecto al nadir de la luminaria: una zona se aplica para ángulos superiores a 80° con respecto al nadir y otra para ángulos superiores a 90° con respecto al nadir.

Ilustración 10 Cut Off Corte total



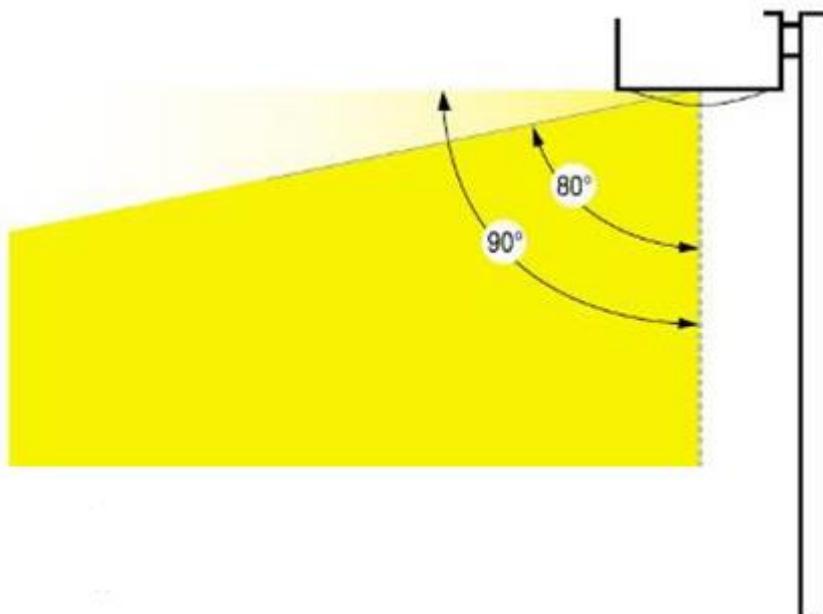
Fuente: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA)

Corte total

Permite:

No hay luz a 90° (100cd por 1000 lúmenes a 80°)

Ilustración 11 Cut Off Corte



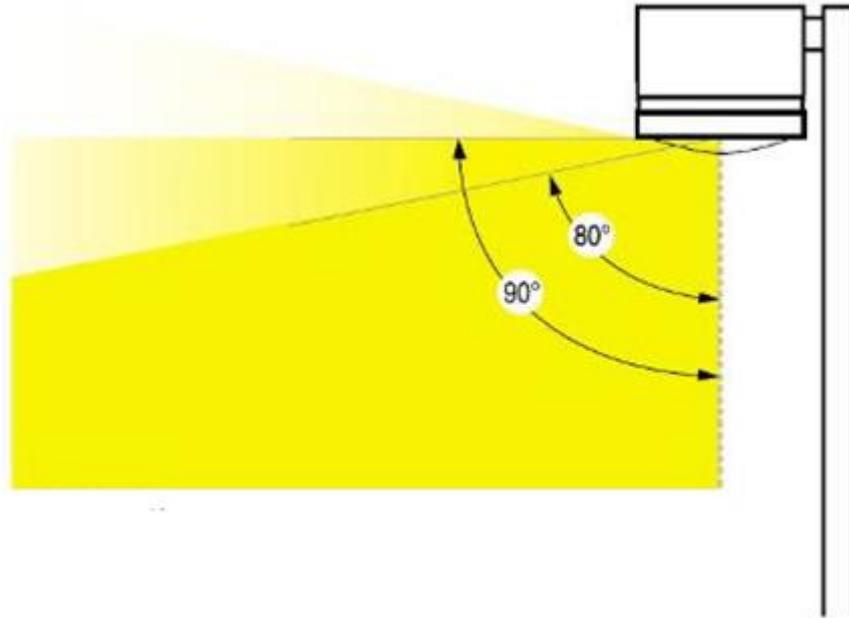
Fuente: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA)

Corte

Permite:

25cd por 1000 lúmenes a 90° (100cd por 1000 lúmenes a 80°)

Ilustración 12 Cut Off Semicorte



Fuente: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA)

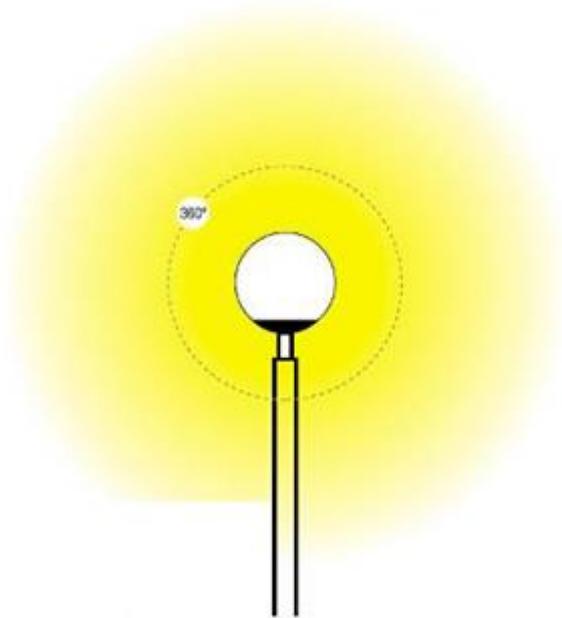
Semicorte

Permite:

50cd por 1000 lúmenes a 90°

200cd por 1000 lúmenes a 80°.

Ilustración 12 Cut Off sin corte



Fuente: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA)

Sin corte

Permite:

Distribución de la luz sin restricciones en cualquier ángulo

Por ello podemos diferenciar cuál de estas categorías se adapta a las necesidades de cada emplazamiento y cuales no son recomendables utilizar.

Conforme a lo que hemos visto en este trabajo, las luminarias que se deberían de instalar son las que disponen de un corte total. Estas evitan la salida de luz por encima del hemisferio superior de la luminaria, evitando causar problemas por luz intrusa, reflejos y contaminación del cielo nocturno. Son las menos dañinas, y las más eficientes.

Las peores y por ello menos eficientes son las luminarias que emiten en 360°, estas, disponen de un gasto energético mucho mayor ya que disponen de una pérdida de luz muy grande porque se está “tirando luz al cielo”, además de mandar luz sobre el hemisferio superior de la luminaria que puede incidir sobre las ventanas de los vecinos

ocasionando molestias innecesarias, así como la incidencia de la luz que se emite al cielo, contaminando el cielo nocturno.

5.2 Luz intrusa.

Este fenómeno es el resultado de la luz artificial que llega desde un lugar o carretera y entra por las ventanas, invadiendo el interior de las viviendas.

La eliminación total de este fenómeno es prácticamente imposible porque siempre habrá luz reflejada en las paredes y en el propio suelo, que acabará entrando por las ventanas. La luz directa e intrusiva es la más incómoda. Sin embargo, este fenómeno puede reducirse drásticamente en las instalaciones existentes asociando accesorios, como rejillas o persianas, que minimicen o eliminen la luz intrusa directa, y utilizando sistemas ópticos que minimicen la luz intrusa indirecta.

Ilustración 13. Efecto de la luz intrusa



Fuente: Boos Technical Lighting

En la práctica es muy difícil cuantificar la luz intrusa. Se pueden utilizar programas informáticos de luminotecnia para calcular la cantidad de luz que llega a una determinada superficie vertical, pero existe una alta probabilidad de errores, dadas las variables que interfieren en este parámetro.

Por otra parte, en algunos casos, y dentro de ciertos límites, lo que se considera luz intrusa puede ser en realidad una variable que contribuye a la sensación de seguridad o a la humanización de los espacios.

Eliminar por completo la luz intrusa llevaría que en el caso de la imagen una persona no fuese capaz de distinguir el agujero de la llave de su puerta. La iluminación se centraría en el suelo de la calle y evitaría “lanzar” luz a las paredes.

Efectos de malas prácticas en el diseño e instalación de alumbrado público.

En estas imágenes podemos observar, como se ha de actuar a la hora de iluminar la fachada de un edificio. La iluminación para fachadas, se realiza por inundación, por lo que lo más importante es cuadrar la iluminación al área a iluminar. Si el área a iluminar no dispone de muchos resaltes y contrastes la mejor forma de hacerlo sería desde arriba. Si por el contrario disponemos de muchos resaltes (que pueden llegar a generar sobras, es mejor realizarlo desde el lado contrario a lo que queremos iluminar.

Ilustración 14.



Fuente: Luminotecnia Indal

Una de las malas actuaciones a la hora de iluminar una fachada o valla publicitaria más utilizada es mantenerlas encendidas durante toda la noche, cuando no es necesario.

Además, la recomendación (siempre que se pueda) es dirigir la luz de manera descendente, intentando evitar dirigir la luz de manera ascendente ya que es muy

complicado que no mandemos luz por encima del área que queremos iluminar o que el reflejo de la luz sobre el mismo genere luz enviada al cielo.

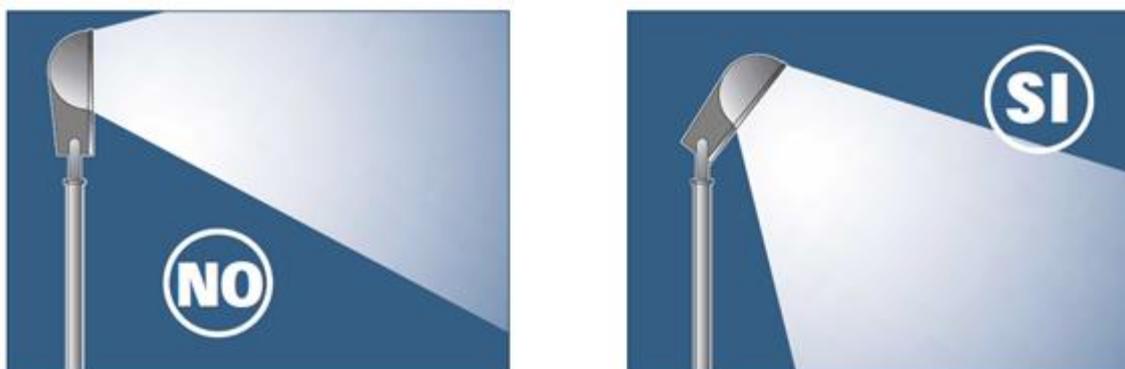
Ilustración 15.

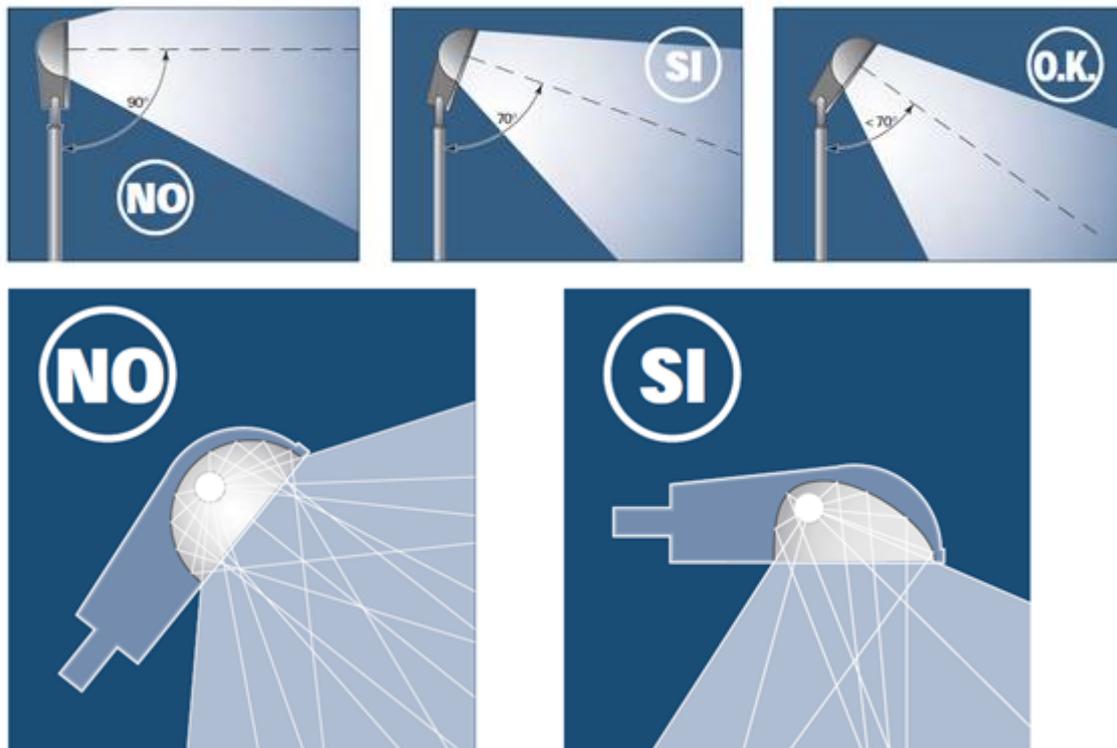


Fuente: Luminotecnia Indal

En iluminación se intenta siempre dirigir la luz solo al área que es necesario iluminar, en las dos imágenes anteriores puede observarse que hay en ciertos casos en los que se pierde la luz que se dirige a una zona completamente innecesaria.

Ilustración 16.





Fuente: Luminotecnia Indal

Quando hablamos de proyección, se debe entender que aumentando la altura se reduce el ángulo de orientación de los aparatos por lo que se reduce el deslumbramiento, y la posibilidad de contaminación del cielo nocturno.

Ilustración 17.



Fuente: Luminotecnia Indal

Cuando hablamos de bolas de luz, es necesario eliminar todo lo que suponga una salida de luz por encima del hemisferio superior de la luminaria, por los motivos antes comentados.

6. Aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar un proyecto de iluminación.

A la hora de desarrollar un proyecto de iluminación, es necesario tener en cuenta todos los factores que favorecen la aparición de la contaminación lumínica en aras de reducir los efectos adversos sobre el entorno, los seres vivos y el impacto económico que esta pueda causar.

Por lo tanto se van abordar una serie de medidas o actuaciones que se deberían tener en cuenta y que buscan dar solución a dichos problemas disminuyendo la magnitud de la contaminación lumínica y reduciendo, en la medida de los posible, su impacto.

En primer lugar, se ha de hacer un estudio sobre la energía o luz que es precisa iluminar una zona conforme a los reglamentos y las características de la vía. No se necesita la misma energía para iluminar una calle peatonal, que para iluminar un puerto; cada uno tendrá unos requerimientos energéticos en función del uso y los requerimientos que tenga cada instalación. No solo se ha de estudiar la energía necesaria, sino que se ha de tener en cuenta el impacto energético, medioambiental hacia los humanos y el resto de seres vivos, que supone una iluminación mal gestionada.

Además de los estudios, se ha de dotar a la tecnología de una serie de mecanismos que reduzcan por un lado la propia contaminación y por otro, las consecuencias nocivas derivadas de éstas.

En cuanto a las medidas destinadas a **reducir la contaminación lumínica** encontramos:

1. **Sensónica**: con el objetivo de suministrar luz cuando se detecte presencia de un usuario (ya sea ciclista, viandante, vehículo...) iluminando de acuerdo con las necesidades de cada momento, para ahorrar energía y reducir el impacto de la iluminación exterior artificial al estrictamente necesario.

2. Inteligencia: luminarias interconectadas en un sistema de smartcity. Un sistema único que sea capaz de gestionar todos los elementos de la ciudad desde un solo programa. un sistema que gestione las rutas de los camiones de basura, el alumbrado público, los sistemas de riego, estaciones meteorológicas...
3. Desarrollar ópticas que optimicen la salida de luz aumentando la eficiencia y llevando la luz donde verdaderamente es necesario para reducir la contaminación lumínica.
4. Diseño eficiente y reciclable. estando atentos al desarrollo de las nuevas tecnologías, nuevas aplicaciones y nuevos materiales, para ser capaces de poder sustituir el sistema de economía lineal por uno más eficiente y sostenible como el sistema de economía circular, así como el desarrollo de tecnologías como los “aditive systems” que cambiarán el modo en el que funcionan las industrias.
5. Tunable White: Un sistema que está siendo desarrollado por muchas compañías de iluminación interior y exterior, que es capaz de cambiar (dependiendo de cada situación y momento) la temperatura de color (y por consecuencia de su espectro) para adaptarse a cada situación con el espectro menos dañino para el ecosistema y ofrecer cuando surja la necesidad, otro tipo de iluminación más conveniente para la llegada de un vehículo o peatón.

Por otro lado en cuanto a las medidas enfocadas en **reducir los efectos de la contaminación lumínica**, cabría destacar:

1. ULOR(Upward Light Output Ratio): Relación de salida de luz hacia arriba, diseñar las luminarias para que la luz no salga por encima del hemisferio superior de la luminaria.
2. Sistemas de control de iluminación intrusa: productos y sistemas que eviten la iluminación intrusa y puedan llegar a suponer un problema para los ciudadanos.

Estas medidas sirven para reducir por un lado el impacto de la contaminación lumínica y otras para evitar que se produzcan dichos efectos adversos.

7. Conclusiones.

Este trabajo tiene una idea clara, estudiar los prejuicios que la iluminación exterior artificial está causando en la biodiversidad y las posibles soluciones que se implementarán en el mercado de la iluminación para paliar dichos efectos.

La iluminación exterior artificial se enfrenta a varios retos importantes que someterán a estudio tanto las tecnologías actuales, como sus procesos productivos, como los materiales, como los objetivos de los próximos 20 años. La proliferación en el pasado de las malas actuaciones en la iluminación, sobre todo producidas por el desconocimiento de los posibles efectos de dichas malas prácticas, por un mercado con enormes barreras de entrada y dominado por pocas empresas, por anteponer el diseño, estilo y moda del momento a las prácticas responsables y por otras muchas razones, han hecho que hoy todavía muchas de esas malas prácticas sigan causando efectos sobre humanos, animales y plantas.

Muchos son los efectos que estas malas actuaciones causan sobre los animales, (afectando en sus flujos migratorios, reproductivos y de alimentación), plantas (descuadrando sus flujos fotosintéticos y su capacidad de desarrollo), humanos (afectando a los ritmos circadianos)... Algunos de estos efectos son solucionables siempre que las administraciones públicas tengan la voluntad de exigir un tipo de luminaria que respete unas normas y unas características apropiadas para lugar donde se instalen. Otros efectos, como la reflexión y refracción de la luz con dirección hacia el cielo nocturno, no pueden llegar a controlarse, ya que no son producidos por las luminarias, sino que están condicionados por las características de los materiales que la rodean.

Estos efectos, aunque parezcan insignificantes han llegado a transformar ecosistemas, modificando las cadenas tróficas, llegando a lastrar el funcionamiento de estos de manera irreversible. Lo que este trabajo pretende, es hacer ver las posibles consecuencias que puede llegar a tener la elección de una luminaria sin seguir los estándares necesarios, de manera irresponsable e ilustrar la dirección del mercado de la iluminación exterior en esta materia.

En el futuro sería necesario que los proyectos de iluminación, además de cumplir los estándares técnicos exigibles, se aporte un proyecto de impacto medioambiental del propio proyecto de iluminación para que se pueda valorar si el material a instalar puede llegar a suponer un perjuicio indeseado sobre el entorno.

8. Bibliografía:

American Medical Association (2016). *Human and Environmental Effects of Light Emitting Diode (LED) Community Lighting*. Council on Science and Public Health EEUU

Comité Español de Iluminación, IDAE (Marzo de 2001). *Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación: Alumbrado Público*. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Gobierno de España. Recuperado el 22 de junio de 2021 de https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_gt_ee_iluminacion_alumbrado_publico_9a40dc27.pdf

Department of the Environment and Energy (2020). *Light Pollution Guidelines National Light Pollution Guidelines for Wildlife Including marine turtles, seabirds and migratory shorebirds* Australian Government. Recuperado el 16 de mayo de 2021 de <https://www.environment.gov.au/biodiversity/publications/national-light-pollution-guidelines-wildlife>

Dirección General de Redes de Comunicación, Contenido y Tecnología (2013). *Iluminando las ciudades. Acelerando el Despliegue de Soluciones de Iluminación. Innovadoras en las Ciudades Europeas*. COMISIÓN EUROPEA. Recuperado el 22 de junio de 2021 de https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/alumbrado_exterior/documentos_iluminando_las_ciudades_libro_verde_european_commission_faccb514.pdf

disanoledtechnology.it Recuperado el 16 de mayo de 2021.
<http://disanoledtechnology.it/en/is-led-street-lighting-bad-for-your-health/>

Ecological Consequences of Artificial Night Lighting Edited by Catherine Rich • Travis Longcore (2006)

Infoauralight.medium.com. Recuperado el 20 de marzo de 2021.

<https://infoauralight.medium.com/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Inventario (2017) . *Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España*. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, Gobierno de España. Recuperado el 18 de marzo de 2021 de:

https://www.idae.es/sites/default/files/inventario_consumo_y_potencial_ahorro_alumbrado_exterior_2017_v2.pdf

Lynch, David K.; Livingston, William Charles (October 2013).. p. 231. *Limits of the eye's overall range of sensitivity extends from about 310 to 1050 nanometers*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Color and Light in Nature (2nd ed.)

Manual da Poluição Luminosa (2009). *Atuações para o seu Controlo/Redução*. CPI Centro português de iluminação

Manual práctico de INDALUX (2002). *Luminotecnía*. España: Ed 1

RED ESPAÑOLA DE ESTUDIOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA (Marzo 2019). Proyecto de Real Decreto por el que se actualiza el Reglamento de Eficiencia Energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones Técnicas Complementarias. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, Gobierno de España

San Martín Páramo, Ramón Més, Solano Lamphar, Héctor, Francia Payàs, Pau García Gil, Manuel (2012). *Contaminación lumínica : una visión desde el foco contaminante : "El alumbrado artificial"*. España: Ed Iniciativa Digital Politècnica, UPCGrau.

Valenzuela, David (2011). «*Espectro Electromagnético*». Físic. Chile: Pontificia
Universidad Católica de Valparaíso.