

Capítulo 17

Impacto Ambiental de los Sistemas de Iluminación

Leonardo Assaf, Gautam Dutt y Carlos Tanides

1. Efectos asociados a la generación de energía eléctrica

- 1.1. Cambio climático
- 1.2. Efectos de la contaminación por SOX, NOX
- 1.3. Generación hidroeléctrica
- 1.4. Generación nuclear

2. La contaminación asociada a la generación eléctrica debido al consumo energético en la iluminación en Argentina

3. Desechos contaminantes de los sistemas de iluminación

4. Efectos biológicos nocivos

5. Polución luminosa o contaminación de luz

- 5.1. Distracción visual
- 5.2. Discomfort visual (deslumbramiento psicológico y fisiológico)
- 5.3. Velo astronómico

Se ha visto en el *Capítulo 1: Introducción* la clara relación existente entre medio ambiente y energía y los muy diversos impactos producidos—que varían en importancia y en el alcance geográfico.

En particular, la iluminación constituye un importante consumo de electricidad, siendo de esta manera responsable, en la proporción de su consumo, de la degradación ambiental originada por la generación eléctrica. La contaminación atmosférica por la generación eléctrica cuando ésta se realiza en centrales termoeléctricas (que queman combustibles) representa uno de los mayores aportes de contaminación.

Por otro lado, los componentes de los sistemas de iluminación generan una diversidad de desechos contaminantes al fin de su vida útil, que en algunos casos son tóxicos a lo que habría que agregar los efectos biológicos nocivos, producto de las radiaciones asociadas a la iluminación. Por último, se puede mencionar la “*Polución Luminosa*” o contaminación de luz.

Se analizan en este capítulo cada una de estas manifestaciones ambientales asociadas a los sistemas de iluminación.

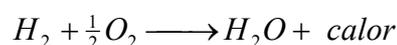
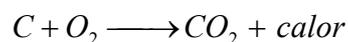
1. Efectos asociados a la generación de energía eléctrica

1.1. Cambio climático

Dada la estructura de fuentes que sustentan nuestras necesidades energéticas en donde ***el 86 % de la energía primaria*** utilizada por la humanidad proviene de la utilización de combustibles fósiles, emerge rápidamente que los problemas asociados a su extracción, transporte y consumo ocupan uno de los sitios más destacados dentro del conjunto de preocupaciones relacionadas con esta temática.

Las centrales termoeléctricas generan energía eléctrica a partir del empleo de combustibles (fósiles o no).

Realizando un análisis en forma teórica (ideal) considerando los componentes fundamentales de todo combustible fósil (y la biomasa) —carbono (C) e hidrógeno (H₂)— tendremos que la combustión (oxidación) de estos elementos libera calor (efecto buscado) y produce principalmente CO₂ y vapor de agua según lo muestran las siguientes ecuaciones:



Las proporciones de CO₂ y H₂O emitidas dependerán, respectivamente, de las proporciones de C y H₂ que se encuentren en el combustible quemado. El CO₂ en la atmósfera contribuye al llamado *Efecto Invernadero* que se describe a continuación.

*Balance radiativo de la tierra y efecto invernadero*¹

La temperatura media de la Tierra queda determinada por la cantidad de energía entrante y saliente del planeta. Ahora bien, como la Tierra está suspendida en el vacío la única posibilidad de intercambiar energía con el exterior es a partir de los ingresos y egresos de radiación electromagnética, quedando excluidos los fenómenos de conducción y convección del calor. Por este motivo a la sumatoria de entradas y salidas de energía radiante se la conoce como *Balance Radiativo de la Tierra*.

Dentro de los *ingresos* de energía el único relevante es el constituido por la fracción de la radiación solar que llega a la Tierra².

Las *salidas* de energía pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: a) energía reflejada y b) radiación de onda larga.

La primera está constituida por la radiación solar reflejada directamente por la atmósfera, las nubes, los aerosoles en suspensión y por la superficie terrestre (albedo), mientras que la radiación de onda larga está determinada por la temperatura de la atmósfera, las nubes y la superficie terrestre y se produce, enteramente, dentro de la zona infrarroja lejana (con longitud de onda alrededor de 10 micrómetros, es decir diez veces más largas que la radiación infrarroja cercana emitida por el Sol). La Figura 1 ilustra los ingresos y egresos de energía a la Tierra y algunos intercambios dentro de la atmósfera.

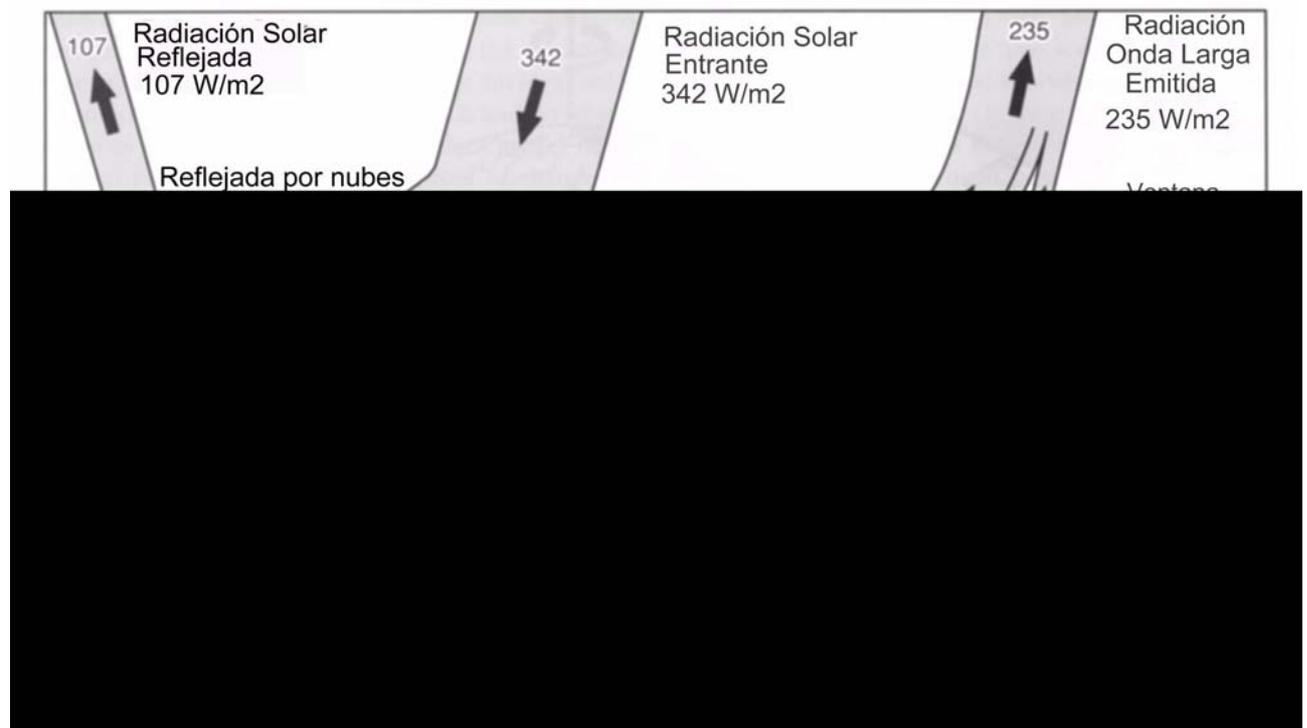


Figura 1. Radiación y balance energético terrestre. [IPCC, 1996, p.58]

¹ El término invernadero proviene de la comparación con los invernaderos utilizados para aplicaciones agrícolas o botánicas que basan su funcionamiento en el mismo principio.

² La forma de la distribución espectral y la cantidad de energía de esta radiación quedan determinadas por leyes físicas: la ley de la radiación de Planck y la ley de Stefan y Boltzmann respectivamente.

Ahora bien, ciertos elementos (o materiales) se comportan selectivamente frente a las distintas longitudes de onda de la luz. Esto significa que la cantidad de radiación que dejan pasar (transmisividad) varía en función de la longitud de onda. En el caso particular del CO₂ éste presenta una alta transmisividad para las longitudes de onda más cortas (como son las que llegan del Sol) y una baja transmisividad para las longitudes de onda pertenecientes a la zona de las infrarrojas lejanas (como lo es la radiación terrestre que corresponde a la de un cuerpo a temperatura de alrededor de 15 °C). La presencia de CO₂ y otros gases con similares características implica que la energía se acumula en la atmósfera —mientras incide la radiación solar— elevándose la temperatura en su interior pues la cantidad de energía entrante es mayor que la saliente (emitida). En estas condiciones, la temperatura media de la Tierra aumenta hasta que se alcance un nuevo equilibrio entre la energía entrante y saliente. En síntesis, la atmósfera terrestre actúa como un gigantesco invernadero evitando la pérdida de calor por radiación al espacio exterior y manteniendo los valores medios de temperatura planetaria dentro de los rangos que hacen posible la vida tal cual la conocemos en la actualidad. Se estima que de no existir este Efecto Invernadero la temperatura media del planeta descendería alrededor de 30 C respecto de la temperatura media actual (15 °C).

Gases de efecto invernadero (GEI) y cambio climático

A los gases que tienen la propiedad, descrita en el punto anterior, de retener radiación de onda larga se los conoce como Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El CO₂ no es el único GEI, y ni siquiera es el más poderoso, aunque es considerado uno de los más preocupantes por las enormes cantidades que se emiten. Entre los GEI más importantes se pueden mencionar, el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), y los clorofluorcarbonos (CFC).

El aumento de la concentración de GEI y, por ende, incremento del efecto invernadero, es uno de los factores que interviene en la generación de un problema “global” conocido como Cambio Climático que se manifiesta como una variación en las magnitudes, y/o en los patrones de distribución espacial y temporal de las variables climáticas (temperatura, régimen de vientos, humedad, régimen de lluvias, etc.).

Entre las diversas causas que pueden provocar cambio climático se encuentran las *externas* y las *internas* (al planeta) y entre estas últimas las *naturales* y las *origen humano*.

Dentro de las *causas externas* se pueden mencionar las variaciones en la órbita terrestre alrededor del Sol (conocidas como Ciclos de Milankovitch), la variabilidad de la fuente solar debido a los ciclos de manchas solares sobre su superficie que alteran los niveles de radiación, la variación en el nivel de irradiancia total y el impacto de meteoritos o cometas.

Una de las *causas internas de origen natural* es la causada por las erupciones volcánicas que inyectan en la atmósfera enormes cantidades de polvo y aerosoles que reflejan los rayos solares³.

Finalmente, dentro de las diversas perturbaciones de *origen humano* introducidas en el sistema climático terrestre, está aquella asociada con la emisión de crecientes cantidades de GEI que es el tema que ocupa nuestra atención. En la Figura 2 se detalla la evolución en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Además de la estacionalidad, se observa un crecimiento continuo desde 1958.

³ La erupción del Monte Pinatubo (Filipinas) en 1991, determinó una disminución de la temperatura media de la Tierra de 0,3 °C durante 2 años.

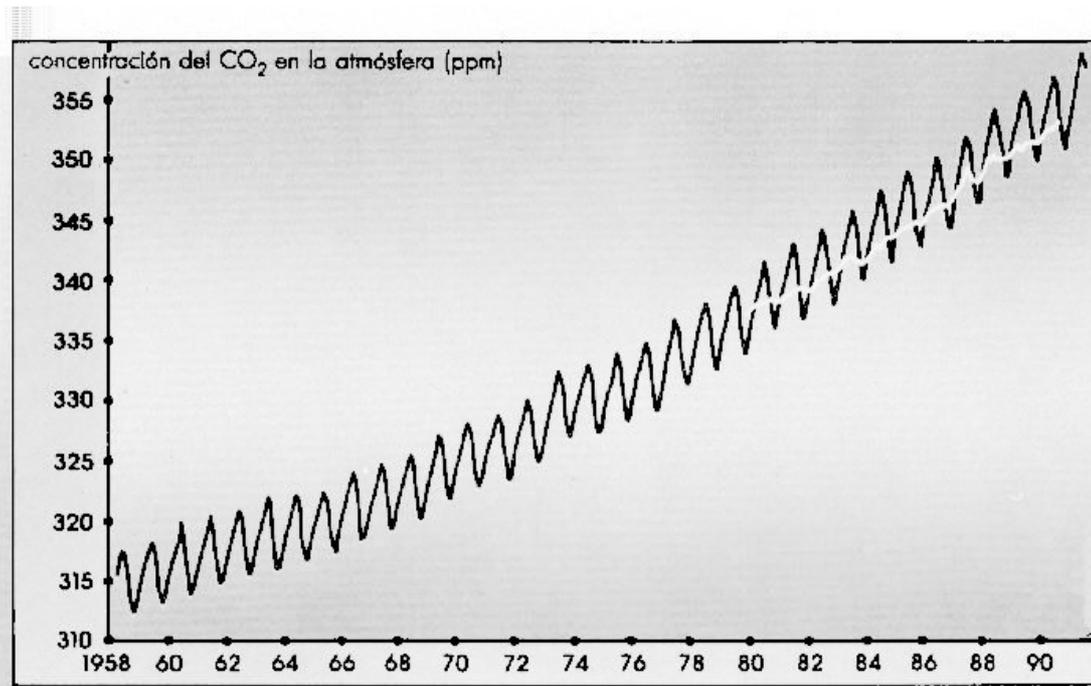


Figura 2. Elevación de la cantidad de CO₂ en la atmósfera. El trazo continuo oscuro representa mediciones efectuadas en la cima de una montaña en Hawai (Mauna Loa), mientras que la línea clara mediciones que comenzaron a realizarse a partir de 1980 en la Isla de Amsterdam (en la Antártida).

Datos y conjeturas acerca del Cambio Climático

Existe un gran debate científico acerca de las posibles consecuencias de un incremento del efecto invernadero debido a la intervención humana en el sistema climático terrestre, fundamentalmente debido a la enorme cantidad de incertezas y a la falta de conocimientos en muchas de las áreas involucradas. En principio para comprender cuáles son las consecuencias de la actividad humana en el sistema climático terrestre es necesario poder discernir entre la variación climática “natural” que resulta de causas externas o internas, ya enumeradas, y la originada por el hombre, tarea que no resulta simple.

Más específicamente, las dudas crecen al intentar:

- a) estimar las emisiones futuras y el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos de los GEI, aerosoles y precursores de los aerosoles y sus propiedades radiativas y;
- b) modelar los procesos climáticos (las incertezas son mayores en los modelos hidrológicos que en los de temperatura), y especialmente cómo actúan las realimentaciones asociadas con las nubes, océanos, hielo marino y vegetación.

Por último, y no menos importante, existe un gran desconocimiento en el área de procesos no lineales —como lo es el sistema climático— que tienen un comportamiento impredecible ante variaciones forzadas.

Esta indeterminación conspira contra la adopción de políticas concretas para la reducción de las emisiones de CO₂, contraponiéndose al **Principio Precautorio** que establece que: “ante la duda acerca de las consecuencias derivadas de una determinada acción y en ausencia de certeza científica en un determinado tema, deberán evitarse tomar las acciones”.

Dentro del campo de lo que ya se ha comprobado científicamente, se puede realizar el siguiente resumen:

- Las concentraciones atmosféricas de los GEI, dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, han aumentado en forma significativa desde tiempos preindustriales (1750): aproximadamente 30%, 145% y 15% respectivamente (valores de 1992). Estas tendencias se pueden atribuir a la actividad humana, principalmente al uso de los combustibles fósiles, a cambios en el uso de la tierra y a la agricultura.
- La temperatura media mundial del aire superficial se ha incrementado entre 0,3 y 0,6 °C desde fines del siglo XIX siendo los últimos años los más calurosos desde que existen mediciones, en 1860.
- El nivel de los océanos se ha elevado entre 10 y 25 cm durante los últimos 100 años y gran parte de este incremento es debido al incremento de la temperatura media mundial.

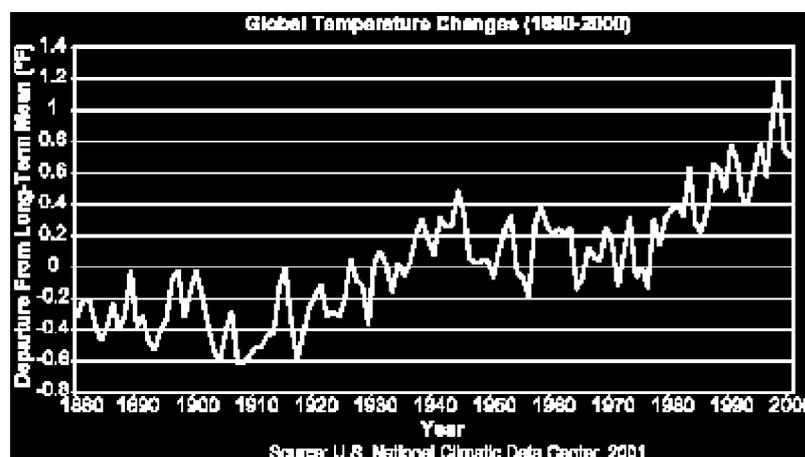


Figura 3. Variación de la temperatura media de la Tierra, 1880-2000, respecto a su valor medio de largo plazo. Valores en grados Fahrenheit (F). 1 F = 0,55 C. La temperatura media ha aumentado alrededor de 0,5 C desde 1950.

A partir de estos datos los modelos acerca de la futura variación del clima terrestre se basan en evaluar las futuras emisiones de GEI y aerosoles teniendo en cuenta estimaciones acerca del crecimiento de la población y la actividad económica, patrones de uso de la tierra, los cambios tecnológicos, la disponibilidad y los tipos de fuentes energética, y de modelizaciones de la atmósfera y el océano efectuadas para el periodo el período 1990-2100. El escenario *medio* proyecta *en términos generales*:

- Un calentamiento global que redundará en una mayor cantidad de días extremadamente calientes y en un descenso en la cantidad de días extremadamente fríos. El ciclo hidrológico se verá incrementado con mayores precipitaciones y humedad del suelo, sobre todo en el hemisferio norte. Habrá un incremento en el nivel de los océanos. Habrá mayor actividad fotosintética debido al aumento en la cantidad de CO₂.

Y en forma más específica:

- Un incremento de la temperatura media del aire de 2 C para el 2100 respecto de 1990. (Como dato comparativo tenemos que la variación de la temperatura media del planeta entre glaciaciones ha oscilado entre 3 y 5 C).

- Una elevación del nivel de los océanos de 50 cm, debido a su expansión térmica y el derretimiento de las masas de hielo polares.

Existen numerosos mecanismos internacionales que promueven de diferentes maneras — financiera, educativa, etc.— la reducción en las emisiones de los gases de efecto invernadero y principalmente del CO₂. La reducción de estas emisiones es posible en muchas áreas, pero las medidas de eficiencia energética han demostrado ser las que tienen mejor efectividad entre todas las opciones.

1.2. Efectos de la contaminación por SO_x, NO_x

En el proceso de combustión, además de CO₂ y vapor de agua se emiten otros gases. Uno de ellos es el dióxido de azufre (SO₂), que proviene de la combustión del azufre contenido en el carbón mineral y en el petróleo. El SO₂ a su vez se oxida formando el trióxido de azufre (SO₃). El conjunto de óxidos SO₂ y SO₃ suele llamarse SO_x. Otros a considerar son los óxidos de nitrógeno que surgen debido a que en la práctica no se utiliza oxígeno puro como comburente sino aire, compuesto principalmente por nitrógeno y a que, a su vez, los combustibles contienen una proporción de este elemento. A altas temperaturas en los procesos de combustión el oxígeno reacciona con el nitrógeno formando monóxido de nitrógeno (NO) que también oxida parcialmente, formando el dióxido de nitrógeno (NO₂). La combinación de estos dos óxidos de nitrógeno se denomina NO_x.

El SO₃ y el NO₂ combinan con el agua en la atmósfera transformándose en *ácido sulfúrico* (H₂SO₄) y *ácido nítrico* (HNO₃), respectivamente.

Precipitación seca y lluvia ácida

En algunos casos las partículas de ácidos sulfúrico y nítrico originadas a partir de las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno generados en los procesos de combustión desaparecen del aire por gravedad o por impacto contra los edificios, las plantas, el suelo, etc. produciendo la llamada «precipitación seca». En las cercanías de las fuentes de emisión, la precipitación suele ser "seca".

El resto de las partículas ácidas se disuelven en las gotas de lluvia y abandonan la atmósfera con las tormentas produciendo una precipitación más ácida de lo normal conocida como Lluvia ácida. Una lluvia "normal" tiene un grado de acidez (pH) de 5,6 aproximadamente. *Técnicamente la lluvia se considera ácida si su grado de acidez es menor de 5,6.* Desde la Revolución Industrial, la acidez de la lluvia ha aumentado en todo el mundo entre cinco y treinta veces. En algunos lugares, la lluvia es mil veces más ácida que antes. Este fenómeno comienza a evidenciarse desde 1930, pero toma importancia a partir de 1970. Uno de los casos de mayor acidez en la lluvia de los que se tiene noticia, tuvo lugar al principio de una tormenta en Pitlochry (Escocia), en 1974. El grado de acidez era de 2,4 lo que hizo a la lluvia tan ácida como el vinagre.

Los efectos sobre el ser humano y el ambiente dependen del tipo de sistema en cuestión, por lo que se tratarán por separado.

Efectos sobre la salud humana

Los efectos tóxicos de estos compuestos de azufre sobre los seres humanos y los animales, se deben a la presencia de partículas de polvo y aerosoles de ácido sulfúrico. La lluvia ácida en si misma no parece representar un peligro directo para la salud humana. Sin embargo, las partículas de sulfato que caracterizan la precipitación seca no son lo suficientemente grandes como para ser repelidas por la defensas del pulmón y suelen provocar trastornos respiratorios. La respuesta fisiológica a la acción irritante de estos compuestos es la broncoconstricción, con el consecuente desmejoramiento de la función pulmonar.

Efectos sobre los vegetales

Los ácidos no sólo erosionan la superficie de las hojas, sino que también penetran obstruyendo la fotosíntesis.

La lluvia ácida perjudica la flora y fauna microbiana responsables en gran medida de la fertilidad de los suelos, y moviliza a los metales pesados que se encuentran en los suelos los cuales penetran en las plantas, intoxicándolas.

Se cree que la lluvia ácida puede reducir la producción de bosques de algunas zonas en un 10 %, pero resulta difícil distinguir los efectos de los distintos mecanismos causales que entran en juego. Experimentos controlados que simulaban lluvia ácida sobre cultivos agrícolas han demostrado que ésta también puede afectar su rendimiento.

El tema es de gran preocupación en el hemisferio norte (Europa Central, Escandinavia, América del Norte) en donde los bosques presentan distintos (a veces muy importantes) grados de daño.

Efectos sobre los suelos

Los óxidos de azufre y el ácido sulfúrico provocan, si su concentración es elevada, la destrucción de la vegetación. De esta forma los suelos se ven privados de la materia orgánica y aumentan su acidez, disminuyendo su capacidad de absorber agua y modificando por tal causa su estructura y textura. La ausencia de vegetación favorece la acción hídrica y eólica transformando el suelo en un desierto.

Los suelos poseen una capacidad de regulación que depende de la concentración de calcio. Muchos suelos, principalmente los de las regiones secas, son ricos en estos iones. Por el contrario, los de las regiones húmedas, entre ellos muchos del norte de Europa, noreste de Norteamérica y gran parte de los tropicales, están muy lixiviados y tienen concentraciones menores. Tales suelos son muy ácidos, con un pH medio en sus horizontes superiores de 4,0 - 4,5. La filtración de agua de lluvia con un bajo pH incrementa la tasa de lixiviación de los nutrientes.

Lagos y lagunas

La lluvia ácida sobre lagos y lagunas trae consigo dos modificaciones inmediatas: la *primera* y obvia es el descenso del pH en el cuerpo de agua, lo que determina una reducción de la cantidad de calcio en la misma. El plancton no soporta la acidificación, el zooplancton tampoco se desarrolla sucediendo lo mismo con las algas, destruyéndose así la base de la cadena trófica.

La posibilidad de reproducción de los peces también se ve afectada pues sus huevos no resisten un pH bajo. Otras especies de peces mueren directamente a causa de la elevada acidez.

La *segunda* modificación, no tan evidente, es el aumento de la cantidad de metales provenientes de las tierras y rocas que rodean al lago y que son lixiviados por la lluvia ácida.

La lluvia ácida moviliza a los metales pesados de las rocas y de los sedimentos, yendo a parar a las aguas superficiales. Es por este motivo que los lagos con acidez en sus aguas contienen altos niveles de cadmio, mercurio, plomo, aluminio, magnesio, zinc, cobre y níquel. Todos estos metales pueden matar a los organismos vivos si su proporción es elevada: su muerte se debe más a la presencia de ellos que a la propia acidez de las aguas.

Efectos sobre construcciones y monumentos

El SO₂ en presencia de partículas y humedad corroe diversos materiales como metales y mampostería. Estos ataques químicos pueden observarse en las instalaciones internas de las

centrales termoeléctricas, que se encuentran ubicadas en las proximidades de las chimeneas de baja altura.

El efecto más visible de la lluvia ácida es el deterioro de edificios y monumentos, principalmente de los construidos de piedra caliza y mármol. Estas rocas, compuestas de carbonato cálcico, tienen excelentes propiedades como materiales de construcción, pero son extremadamente sensibles a los ácidos (muchas construcciones de mármol y piedra caliza de la Antigüedad han sufrido mucho más daño en los últimos 20 años que en sus primeros 20 siglos de existencia). Los efectos se hacen sentir también en estructuras modernas tales como puentes, vías de ferrocarril, etc.

1.3. Generación hidroeléctrica

La construcción de represas hidroeléctricas, representa —en algunos casos— uno de los impactos ambientales del tipo local y/o regional más importantes producidos por el hombre. En particular aquellas que se ubican sobre los ríos de llanura y climas subtropicales y tropicales, resultan ser las más conflictivas por las enormes áreas que inundan y por la complejidad de los ecosistemas que afectan.

Toda central hidroeléctrica necesita de una presa que es una obra civil que interrumpe el curso normal de un río, acumulando agua «aguas arriba» de la misma formando un «embalse», y liberando o no agua en función de su destino dentro del sistema eléctrico.

Debido a la gran variedad de modificaciones producidas, se describirán someramente los distintos fenómenos por separado, aún cuando éstos se interrelacionan.

Modificación del caudal del régimen hidrológico. Debido a que las centrales hidroeléctricas tienen como función principal la generación de energía eléctrica la periodicidad de los caudales aguas abajo de la presa se pierde, en general, afectando a los ecosistemas como se verá más adelante⁴.

Características del agua del río. Es sabido que algunos ríos —como el Paraná—, arrastran gran cantidad de sedimentos confiriéndole al agua su característica turbiedad. El aquietamiento del agua en el embalse, permite que parte de estos sedimentos se depositen gradualmente en el fondo produciendo el fenómeno conocido como «colmatación», que va restando paulatinamente capacidad de almacenamiento al embalse hasta inutilizarlo⁵.

Aguas abajo de la presa, la disminución de la cantidad de partículas sedimentables —captadas en el embalse— afecta principalmente al delta del río en cuestión que son formaciones debidas a un delicado balance entre procesos de sedimentación y erosión.

La calidad del agua embalsada, por otro lado, también debe ser objeto de cuidado. La existencia de poblaciones debería obligar al tratamiento de los vertidos de cloacas y efluentes industriales para no deteriorar la calidad del agua.

Finalmente, la creación del lago eleva el nivel de la napa freática, y puede en algunos casos invertir el flujo de la misma, modificando las características del agua de las mismas.

Problemas sobre la fauna y flora. La destrucción del hábitat ocupado por el área inundada no requiere explicación, y afecta a todas las formas de vida. En el caso de ríos en climas

⁴ Para contrarrestar este efecto, en algunas oportunidades, se hace necesario construir un dique compensador que regule el caudal enviado por la presa principal.

⁵ Este proceso puede verse acelerado por mal manejo de las cuencas: por ejemplo, la tala indiscriminada de selvas y bosques para la utilización de las tierras en la producción agrícola y ganadera que aumentan la cantidad de sedimentos que transporta el río.

subtropicales y tropicales los ecosistemas afectados son generalmente muy complejos y en vías de extinción.

Aguas abajo y en las orillas del embalse la vegetación se ve afectada ante la pérdida de regularidad entre los ritmos de crecientes y bajantes, quedando estas márgenes al descubierto y erosionándose.

Los peces son uno de los organismos más afectados por las represas. En los ríos Paraná y Uruguay existen muchas especies de peces que realizan migraciones reproductivas y tróficas: sábalo, dorado, etc. que ven interrumpido su viaje por una barrera infranqueable⁶.

La destrucción del área de desove y cría de los alevinos, por el área de inundación, agudiza la problemática que se les genera a los peces.

Problemas sobre el ser humano. Los problemas más directos generados sobre el ser humano están relacionados con la destrucción de los patrimonios históricos—tener en cuenta que los valles de los ríos han sido tradicionalmente los sitios donde han proliferado las civilizaciones—, caminos, poblaciones etc., y con los reasentamientos de población que conlleva la modificación de las pautas culturales⁷.

Además ciertas enfermedades se ven favorecidas por las condiciones que generan estos cuerpos de agua. Enfermedades como la esquistosomiasis y el paludismo son algunas de las más conocidas, y potencialmente peligrosas para la región de nuestro noreste. La primera es conocida en Brasil como la «enfermedad de las represas», y es producida por unos gusanos (platelmintos), que parasitan el sistema venoso del hombre produciendo disentería, cirrosis, etc.

1.4. Generación nuclear

Las centrales nucleares utilizan elementos radioactivos para la realización del proceso de fisión nuclear responsable de la liberación de enormes cantidades de calor que, ciclo térmico mediante, es transformado en energía eléctrica. La generación de electricidad en centrales nucleares implica una variedad de riesgos ambientales. Entre ellos destacan las siguientes consideraciones:

Almacenamiento a largo plazo de desechos radiactivos. Algunos de los desechos de las centrales nucleares mantienen su radiactividad durante miles de años, por lo cual el almacenamiento a largo plazo de los mismos desechos es un problema que no ha sido resuelto satisfactoriamente en ningún país. En Argentina, hasta la fecha, no ha sido confirmado algún repositorio para dicho propósito.

Seguridad contra robo de material radiactivo. Se requiere de una pequeña cantidad de material radiactivo concentrado (menos de 10 kg de Uranio o Plutonio) para fabricar un explosivo atómico. Una sustracción de los materiales, por parte de algún grupo terrorista, puede ayudar a la fabricación de tal explosivo e implica un gran peligro para grandes poblaciones humanas y ecosistemas. Por ello, el transporte y manejo de los materiales radiactivos concentrados —entre ellos ciertos desechos de centrales nucleares— requiere gran cuidado en cuestiones de seguridad.

Seguridad en la operación de los reactores existentes. Una central nuclear, en operación normal, no libera cantidades apreciables de material radiactivo, por lo cual su impacto ambiental es menor que muchas alternativas. Por otro lado, es posible diseñar y operar reactores nucleares minimizando la posibilidad de un accidente con la liberación de material radiactivo al ambiente.

⁶ Para solucionar este problema se construyen los «sistemas de transferencia de peces» que son dispositivos que buscan subsanar este inconveniente aunque sin mucho éxito.

⁷ En Salto Grande fue necesaria la relocalización de 13.000 personas y alrededor de 40.000 habrá que reubicar debido a Yacyretá.

Sin embargo, se ha habido accidentes en el transporte de material radiactivo y un accidente notorio (en Chernobyl, Ucrania, en 1986) cuya consecuencia fue la muerte de decenas de miles de personas, hasta ahora.

Efectos sobre la salud. Los efectos de la radiación han sido estudiados con profundidad durante todo el siglo XX y han demostrado una mayor sensibilidad ante la radiación durante la etapa de la división celular, ya que entonces el ADN se está duplicando. La exposición constante a niveles bajos de radiación puede provocar anemia, leucemia, y/o cáncer. Los efectos del tipo genético podrían manifestarse en enfermedades como el síndrome de Down o la acondroplasia (una forma de enanismo). La exposición a niveles de radiación elevados como los debidos a accidentes o explosiones nucleares puede provocar náuseas, diarreas, úlceras, hemorragias y la muerte.

El cuestionamiento más importante a este tipo de generación se relaciona con la utilización de elementos radioactivos ya que los procesos relacionados con su extracción, utilización dentro de las centrales y finalmente su disposición final —una vez que alcanzan el fin de su vida útil— conllevan un peligro potencial de emisiones ya sea por mal manejo, fugas, accidentes, negligencia, mala intención, etc.

2. La contaminación asociada a la generación eléctrica debido al consumo energético en la iluminación en Argentina

La quema de combustibles fósiles utilizadas para la generación eléctrica libera los óxidos de azufre y nitrógeno, material particulado y el dióxido de carbono. Las emisiones de los distintos gases contaminantes se determinan a través de muestreos en las chimeneas de las plantas generadoras y la de CO₂ a partir del contenido de carbono en los combustibles utilizados y la eficiencia de la generación eléctrica. La magnitud de las emisiones normalizadas por la energía generada se llama factor de emisión para el contaminante en cuestión. El Cuadro 1 muestra los factores de emisión de los gases mencionados para centrales a partir de combustibles fósiles en Argentina.

Cuadro 1. Factores de emisión (g/kWh) para los principales contaminantes producidos en centrales de combustibles fósiles en Argentina, 1994-1997. (Fuente: Masei, 1999)				
<i>Contaminante</i>	Factor de emisión en el año			
	<i>1994</i>	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>1997</i>
Dióxido de carbono (CO ₂)	586	576	563	606
Dioxido de azufre (SO ₂)	0.52	0.41	0.35	0.29
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	1.03	1.09	1.15	1.12
Material particulado	0.06	0.05	0.04	0.04

El gas natural es el principal combustible utilizado en centrales térmicas en Argentina. La creciente presencia de centrales de ciclo combinado, que son más eficientes que las centrales tradicionales ha implicado que el factor de emisión de CO₂ ha caído de 727 g/kWh en 1990 a los valores indicados en el Cuadro 1. La predominancia del gas natural y la virtual ausencia de carbón mineral como combustible para la generación eléctrica en Argentina explican los factores muy bajos de emisiones para los contaminantes de aire locales (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado).

El Cuadro 1 no incluye la contaminación de aire de otros tipos de centrales, ni contaminación de agua, degradación de suelos, polución térmica de ríos y lagos, etc.

La electricidad utilizada para la iluminación se relaciona con la electricidad generada de la siguiente manera. Para cada kWh disipada en la instalación de luz, unos 1,15 a 1,20 debe ser generada, si uno toma en cuenta las pérdidas por transmisión y distribución.

Para analizar el impacto de la iluminación en Argentina, el primer paso es cuantificar el consumo de energía para la iluminación. Dicho impacto puede ser reducida mediante el uso eficiente de la energía en la iluminación. Para cuantificar este beneficio, se debe establecer el potencial de ahorro de energía y luego determinar la reducción en la generación de distintos tipos de centrales como consecuencia del ahorro. Un ejercicio de este tipo fue presentado por Assaf, Dutt y Tanides [2002]. La reducción en la emisión de los contaminantes mediante la iluminación eficiente en Argentina, estimado en aquel estudio, se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Reducción en la emisión de los contaminantes en Argentina, mediante la iluminación eficiente. Año base 2000.
(Fuente: Assaf, Dutt y Tanides, 2002)

<i>Contaminante</i>	<i>Toneladas/año</i>
Dióxido de carbono CO ₂	5,09 x 10 ⁶
Dióxido de azufre SO ₂	2.436
Óxidos de nitrógeno NO _x	9.408
Material particulado	336

3. Desechos contaminantes de los sistemas de iluminación

Los sistemas de iluminación producen diversos tipos de desechos, siendo los más perjudiciales los correspondientes a lámparas de descarga agotadas. Año a año millones de lámparas son arrojadas a los basurales, muchas de ellas conteniendo residuos altamente contaminantes como el mercurio. Estos residuos son potenciados si la ampolla es destruida, cosa que lamentablemente ocurre en la mayoría de los casos, cuando la basura es comprimida para facilitar su traslado a los repositorios.

Cada lámpara de descarga, es decir casi todas menos las incandescentes, contiene mercurio, un metal pesado y tóxico que es liberado al ambiente cuando se descarta la lámpara. La cantidad de mercurio en una lámpara varía desde 3 a 50 mg (miligramos).

Las lámparas de mercurio de alta presión utilizadas en el alumbrado público y las mezcladoras llevan la mayor cantidad de mercurio. Las lámparas de sodio de alta presión, utilizadas en el alumbrado público eficiente, también contiene mercurio pero de menor magnitud. La sustitución de lámparas de mercurio de alta presión y de mezcladoras en el alumbrado público por las más eficientes lámparas de sodio de alta presión, también reduce la liberación futura de mercurio al atmósfera. Sin embargo, en dicha sustitución, se liberaría todo el contenido de mercurio de las lámparas desechadas, a menos que se tomen las precauciones adecuadas.

Las lámparas de mercurio de alta presión y las mezcladoras deberán ser sometidas a rotura a fin de rescatar las bases (los mecheros), que posteriormente serán incluidos en bloques de hormigón. Debido al contenido de mercurio, la manipulación, el almacenamiento, el transporte y disposición final de estos elementos están sujetos a las disposiciones de la Ley Nacional 24.051 (*Categorías sometidas a control: Y29 Mercurio, compuestos de mercurio*) sobre residuos peligrosos⁸.

⁸ También existen leyes provinciales sobre residuos peligrosos, por ejemplo, la Ley Provincial de Buenos Aires 11.720.

La industria ha realizado un esfuerzo para reducir el contenido de mercurio en las lámparas de sodio de alta presión, con lo cual mejoraría la situación aún más en el futuro.

Los tubos fluorescentes sostienen la descarga con el vapor de mercurio. Los tubos tradicionales T12 de 40 W llevaban alrededor de 30 mg de mercurio. Según información provista por Osram, las lámparas T10 de 40 W, fabricadas en Brasil contienen sólo 8 mg de mercurio, mientras existen modelos T8 36 W (Lumilux Plus Eco) con tan sólo 4,5 mg del metal en cuestión.

Mientras que para el año 1994, habíamos estimado emisiones totales de mercurio de 440 kg, este valor ha subido muy poco para el año 2000 (ver Cuadro 3), a pesar de un gran aumento en la cantidad de lámparas vendidas y descartadas, debido a la reducción en el contenido de mercurio de las lámparas y el mayor uso de lámparas de sodio de alta presión en lugar de mercurio.

Cuadro 3. Lámparas descartadas y emisiones de mercurio en Argentina, por tipo de lámpara. Estimaciones para el 2000.		
Tipo de lámpara	Cantidad descartadas millones/año	Emisiones directas de mercurio kg/año
Incandescente	140	0
Fluorescente	13.7	386
Mezcladora	0.95	48
Vapor de mercurio	0.37	19
Vapor de sodio alta presión	0,41	8
TOTAL		461
Notas: Suponemos 5 mg de mercurio por lámpara fluorescente compacta, 20 mg por T8 fluorescente, 35 mg por T12 fluorescente, 50 mg por lámpara de vapor de mercurio (incl. mezcladoras) y 20 mg por lámpara de vapor de sodio. Las emisiones de mercurio de los combustibles fósiles utilizadas para la generación eléctrica no fueron consideradas aquí.		

Las emisiones están dominadas por lámparas fluorescentes. En la medida que las instalaciones de iluminación se hace más eficiente con lámparas T8 trifósforo, de mayor duración que las T12 tradicionales y con menor contenido de mercurio por lámpara, se espera una importante reducción de la cantidad de mercurio liberado al ambiente, aún sin considerar ningún tratamiento. Las emisiones de mercurio a partir de las lámparas fluorescentes pueden bajar a 150 kg al año, considerando 15 millones de lámparas descartadas con 10 mg de mercurio cada una.

La sustitución de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas implica un aumento en la cantidad de mercurio en las lámparas y su eventual liberación al medio ambiente. El contenido de las LFC típicamente varía desde 3 a 5 mg por lámpara. Con un programa muy exitoso de promoción de LFC, se puede lograr una venta anual de 10 millones de LFC y el descarte de una cantidad similar. Considerando el valor alto (5 mg) del contenido de mercurio, significa una liberación de 50 kg de mercurio al año, suponiendo ningún tratamiento de las lámparas descartadas.

Sumando los tubos fluorescentes y las lámparas compactas, estimamos la liberación de 200 kg de mercurio al año. Esta cantidad debe compararse con otras fuentes de mercurio, por ejemplo la rotura de termómetros, cuyo contenido de mercurio es mucho mayor. Un programa integral para el control de mercurio comprendería la sustitución de estos termómetros por otros electrónicos.

4. Efectos biológicos nocivos

Las radiaciones asociadas a la iluminación pueden provocar efectos biológicos nocivos sobre las personas y sobre el ecosistema.

Sobre las personas. Los efectos nocivos de las radiaciones sobre personas son [CIE, 1997a]: fotoqueratoconjuntivitis, cataratas por radiación U.V., efectos retardados sobre la piel por radiación U.V., queratitis por radiación U.V., catarata térmica por radiación I.R., daño térmico de retina por radiación I.R., daño térmico sobre la piel, eritema y queratitis por radiación I.R. (termoqueratitis), fotoretinitis por luz azul.

Esas dolencias son provocadas por radiaciones ultravioleta o infrarroja, salvo el caso de la fotoretinitis por luz azul, que es una radiación comprendida dentro del espectro visible.

Por lo general los niveles de intensidad luminosa de las instalaciones de iluminación comunes, cualquiera sea el tiempo de exposición, están lejos de la dosis umbral de las enfermedades arriba mencionadas, no siendo éste un tema que preocupe; salvo casos puntuales como mesas de cirugía, lugares de internación, trabajos de soldadura, etc. Sin embargo no es desatinado que el diseñador realice la verificación de las instalaciones proyectadas.

Para la comprobación de una instalación debe considerarse el valor de *dosis umbral* (intensidad de la radiación por el tiempo de exposición) es decir, aquella dosis a partir de la cual se puede producir daño sobre el organismo.

Sobre ecosistemas. En esta categoría, la atracción de insectos voladores es un fenómeno a tener en cuenta. Se presenta especialmente en las zonas rurales o en espacios con vegetación abundante, extendiéndose la acción sobre muchos kilómetros a la redonda en entornos poco iluminados. Esto ocasiona no sólo molestias a las personas e inconvenientes en el mantenimiento de las luminarias, sino también alteraciones ecológicas en la zona de influencia [Schmid, 1993]. La característica espectral de la atracción de insectos no ha sido aún debidamente establecida, aunque se conoce que el fenómeno tiene su máxima sensibilidad en las longitudes de onda de los 400 nm.

5. Polución luminosa o contaminación de luz

Al margen de los residuos indeseables asociados a los sistemas de alumbrado y los efectos biológicos nocivos, la luz en sí misma puede constituirse en una contaminación del medio ambiente. En primer lugar toda radiación luminosa, cualquiera sea su magnitud, orientada a espacios en donde no sea requerida (luz dispersa) o en cantidad mayor que la necesaria debería ser considerada como una polución ya que de una u otra manera altera el medio ambiente y la calidad de vida. Paralelamente es un índice de ineficiencia energética resultado de un inadecuado diseño de la instalación.

Se pueden mencionar tres efectos de la polución luminosa: distracción visual, discomfort visual y velo astronómico, cada uno de ellos se analiza a continuación.

5.1. Distracción visual

La distracción visual provocada por luz dispersa de origen diverso constituye un problema creciente. Se trata de luces sobre los cuales los damnificados no pueden ejercer ningún tipo de control, por ejemplo haces de luz provenientes del alumbrado público que se filtran por ventanas de dormitorios, letreros de propaganda que pugnan por acaparar la atención o potentes reflectores con los que se pretende exorcizar toda amenaza nocturna de propiedades vecinas.

Las consecuencias son variadas y difíciles de evaluar: desorientación visual de conductores de automóviles y peatones, personas que no pueden descansar, pérdida de intimidad, o simplemente deterioro del paisaje nocturno [Bleasby, 1997].

Aún no se ha realizado una correcta formulación de las consecuencias, no existiendo por el momento ningún tipo de recomendación al respecto. El tema se encuentra actualmente en discusión en la Comisión Internacional de Alumbrado, CIE [CIE, 1997b].

5.2. Disconfort visual (deslumbramiento psicológico y fisiológico)

Brillos intensos o altos contrastes de luminancia en el campo visual pueden producir fatiga. En casos agudos pueden provocar, más que una pérdida de confort, una real disminución del desempeño de personas en sus tareas visuales.

El fenómeno del deslumbramiento ha sido debidamente estudiado, tanto para iluminación de interiores como de espacios abiertos, existiendo recomendaciones sobre como limitarlo [IRAM, 1972].

5.3. Velo astronómico

La creciente iluminación de vías de tránsito y espacios verdes, la mayor propensión al uso del alumbrado ornamental y de seguridad conlleva el incremento de la emisión de luz hacia arriba. Esta radiación puede originarse de dos maneras distintas: en forma directa por radiación de artefactos en el hemisferio superior e indirecta por reflexión de la luz de los sistemas de alumbrado en las superficies iluminadas (albedo). El *scattering* o dispersión producido en las partículas atmosféricas por esa radiación es responsable de la progresiva mutilación visual del cielo nocturno, interponiendo un velo entre nosotros y el cielo. En el afán por iluminar los espacios abiertos para sentirnos seguros, hemos perdido las estrellas y nos aislamos del universo.

Aunque el albedo es un fenómeno incontrolable, la radiación de los artefactos en el hemisferio superior es índice de ineficiencia energética y deslumbramiento. En el Seminario Lux Europea/CIE en 1993, se propuso la calificación de luminarias exteriores en términos de “Upward Light Output Ratio” (la proporción de la luz que se emite hacia arriba) y de “Upward Waste Light Ratio” (la proporción de la luz derrochada hacia arriba). El último índice toma en cuenta el rendimiento lumínico de las luminarias.

Figura 4. Globo en una avenida de Buenos Aires



ilumina hacia arriba.

Figura 5. Globo en un pasaje en Buenos Aires tiene reflector interno para que no haya iluminación hacia arriba

El problema es particularmente grave para la observación astronómica. Ya en 1980, la Comisión Internacional de Alumbrado emitió una guía para reducir el resplandor nocturno cerca de observatorios astronómicos. [CIE, 1990] En 1999, el Comité Español de Iluminación elaboró una Guía para la Reducción del Resplandor Luminoso Nocturno. Dicha Guía incluye recomendaciones respecto al diseño de equipamiento e instalaciones para el alumbrado público y la iluminación decorativa de exteriores. Por otro lado, la International Dark-Sky Association ha desarrollado una normativa para la iluminación de exteriores, que puede ser adoptada por municipios. [IDA, 2000]

Hoy en día, existen excelentes guías de diseño para reducir el resplandor nocturno y otras formas de contaminación luminosa. [CIE, 1997; LTG, 1996; IDA, varios]

Cabe destacar que se pueden diseñar sistemas de alumbrado público de alta eficiencia limitando el resplandor luminoso a la luz reflejada por el pavimento. En un proyecto de alumbrado público en las municipalidades de Vicuña y La Serena, V Región, Chile, se pudo aumentar el flujo luminoso total en un 14%, reduciendo la potencia eléctrica en 48% con una disminución en el 95% en la potencia luminosa emitida hacia arriba. Nuevamente, los objetivos de la eficiencia energética y los ambientales no están contrapuestos.

También existen normas para reducir la contaminación luminosa en varios países europeos y en Chile. En Argentina, la ciudad de Rosario emitió la ordenanza con los mismos fines.



Figura 6. Una avenida en la ciudad de Rosario. La luminaria a la derecha (*noncut-off*) tiene substancial emisión luminosa en el hemisferio superior; no así la luminaria *cut-off* a la izquierda. (Cortesía: Fernando Paukste, Axxon Electric.)

Bibliografía

- Assaf, L., G. Dutt y C. Tanides, 2002. "Lighting efficiency and environmental issues in Argentina: current status and perspectives". *Right Light* 5, Niza, Francia, mayo.
- Bleasby, P., 1997. "Energy and environmental aspects of lighting", Technical Report to CIE Div. 7.
- CIE, 1980. "Guidelines for minimizing urban sky glow near astronomical observatories", Joint Publication Intern. Astron. Union IAU/ CIE, Comisión Internacional d'Eclairage (CIE) Publication 1.
- CIE, 1997. "Guidelines for minimizing sky glow", CIE (Comisión Internacional d'Eclairage) Publication 126.
- CIE, 1997a. Comisión Internacional d'Eclairage (CIE) News No. 41, Marzo.
- CIE, 1997b. "General Aspect of Light", Comisión Internacional d'Eclairage (CIE) Div. 7 Report.
- Fulkerson W., R.R. Judkins y M.K. Sanghvi, 1990. "Energy from Fossil Fuels", *Scientific American*, septiembre.
- IDA, 2000. *Outdoor Lighting Code Handbook*. Disponible en el sitio web de la International Dark-Sky Association: www.darksky.org.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden y D. Xiaosu (Eds.), Cambridge University Press, UK. pp 944.
- IRAM, 1972, "IRAM/AADL J 2006. Iluminación Artificial de Interiores. Niveles de Iluminación", Instituto Argentino de Normalización (IRAM), Buenos Aires.
- LTG, 1996. "Limitación de la luz fuera de control en zonas habitadas", publicación de la Lichttechnische Gesellschaft (Asociación Luminotecnica Alemana), no. 12.2.96.
- Margalef, R., 1986, *Ecología*, Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- Massei, M.C., 1999. "Propuesta de gestión ambiental del Ente Nacional Regulador de la Electricidad", *Revista Electrotecnia*, July-Aug. 1999, pp. 131-135.
- Schmid, L.A.P., 1993. "Impacto económico y ecológico de las lámparas innovativas", Osram Argentina, Buenos Aires.