

VII. Aplicaciones ópticas para estudios ambientales

Dr. Carlos Manuel García Lara

Introducción

Todos los objetos que percibimos son posibles de observar gracias a la luz, ya sea emitida por el objeto o reflejada por él. En la época de los griegos, particularmente la escuela pitagórica planteaba que todo objeto visible emite una corriente constante de partículas, como sucede en un atomizador utilizado en perfumes. Por su parte Aristóteles llegó a la conclusión de que la luz viaja en algo parecido a las ondas, como se puede observar en un estanque al arrojar un objeto. No fue sino hasta mediados del siglo XX que logró hallarse una respuesta medianamente completa, resultando en que ambas teorías estaban en lo cierto^[1].

Para la caracterización de cualquier elemento o proceso se hace necesario el estudio de las propiedades de estos. Los griegos descubrieron que la luz viaja en línea recta, otro gran descubrimiento fue realizado por Herón de Alejandría, observando que al dirigir un haz de luz con un determinado ángulo hacia un espejo, éste lo refleja al mismo ángulo de incidencia, dando como resultado la regla de que el ángulo de incidencia y el de reflexión son siempre iguales.

Otro fenómeno importante observado fue el de que al colocar un objeto sumergido en agua a un ángulo determinado, éste pareciera que se doblara. En 1621, el matemático Holandés Willebrord Snel Van Royen, explicó este fenómeno a través de la refracción que determina que la luz

al viajar en distintos medios (un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado), presenta las siguientes características. Si el haz de luz viaja de manera perpendicular, no existe desviación alguna, pero con una ligera inclinación se producirá un pequeño desvío, incrementándose a medida que la inclinación de entrada aumenta, en otras palabras este fenómeno se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie. No fue sino hasta 1678, que otro holandés, Christian Huygens elaboró la teoría ondulatoria de la luz, donde presenta una fórmula matemática para las observaciones de Snell y la teoría de que el índice de refracción de un material está determinado por la velocidad con que lo traspasa la luz, partiendo del concepto de que cada punto luminoso de un frente de ondas puede considerarse una nueva fuente de ondas (Principio de Huygens). A partir de esta teoría explicó, en su obra *Traité de la lumière*, la reflexión, refracción y doble refracción de la luz. Por lo que ha mayor índice de refracción más lento será el paso de la luz por dicho medio^[2]. Dicha teoría quedó definitivamente demostrada por los experimentos de Thomas Young, a principios del siglo XIX. Las lentes, las máquinas fotográficas, el ojo humano y, en general, la mayor parte de los instrumentos ópticos basan su funcionamiento en este fenómeno óptico.

Por otro lado, es sabido que telescopios ordinarios y catalejos pueden haber sido creados mucho antes, pero Hans Lippershey, fabricante alemán de lentes, como se cree, fue el primero en solicitar una patente por su diseño, y hacerlo disponible para el empleo general en 1608. Y aunque Galileo y otros mejoraron dicho instrumento posteriormente, la comprensión de los principios de funcionamiento no se dio sino hasta que Snell, Huygens y otros enunciaron su teoría.

La palabra lente proviene del latín “lentis” que significa “lenteja” con lo que a las lentes ópticas se las denomina así por similitud de forma con la legumbre. Toda lente o combinación de lentes opera de acuerdo con el principio de refracción, toda vez que la superficie de las lentes es curva. Si la lente es convexa (delgada en las orillas y gruesa en medio), los rayos de luz paralelos que llegan a ella a distintos ángulos se desvían

para formar un haz de rayos convergentes que se concentran en un solo punto, por el contrario si la lente es cóncava (orillas gruesas que se curvan en un centro delgado), los rayos se difunden.

A partir de lo anterior se observa el caso de que si la luz viaja de una sustancia que tiene un alto índice de refracción a otra cuyo grado de refracción sea bajo, y si además llega a la superficie interpuesta entre ambas en un ángulo muy oblicuo, la desviación es tal que ni un solo rayo escapa y la reflexión es absoluta. A este fenómeno se le da el nombre de reflexión interna total, cuyo conocimiento en la actualidad ha sido empleado en el desarrollo de fibras ópticas utilizadas para comunicaciones, medicina, sensores, etcétera.

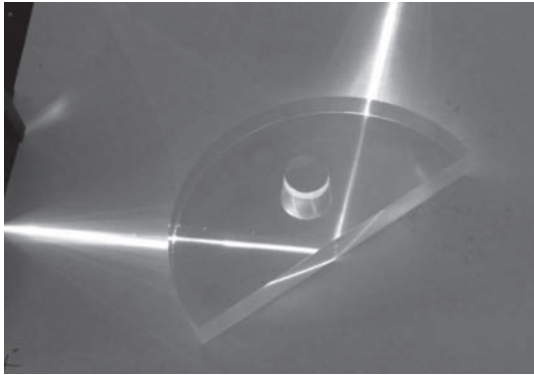


Figura 1. Reflexión interna total, fenómeno que se produce cuando un rayo de luz, atravesando un medio de índice de refracción más grande que el índice de refracción en el que éste se encuentra, se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente^[3].

Por otro lado otro fenómeno importante alrededor de la refracción, es que el grado de desviación de la luz dependerá no sólo de la sustancia que atraviese, sino también del color de la luz de la misma. Lo anterior debido a que a cada color está asociada una longitud de onda, lo cual fue observado por Isaac Newton, físico inglés, que descubrió la propiedad básica de que la luz blanca contiene colores.

El experimento que realizó Newton fue pasar un estrecho rayo de luz por un prisma, en un cuarto oscuro, proyectó en un muro los rayos

resultantes, siendo estos una variedad de colores que conocemos como espectro, a continuación hizo pasar los rayos de colores por otro prisma, combinándolos de nueva cuenta, con lo que volvió al rayo original de luz blanca. Así se demostró que la luz blanca es una combinación de todos los colores y que es posible fraccionarla y unificarla a voluntad. Por último Newton aisló cada uno de los colores y demostró que no podían ser modificados.

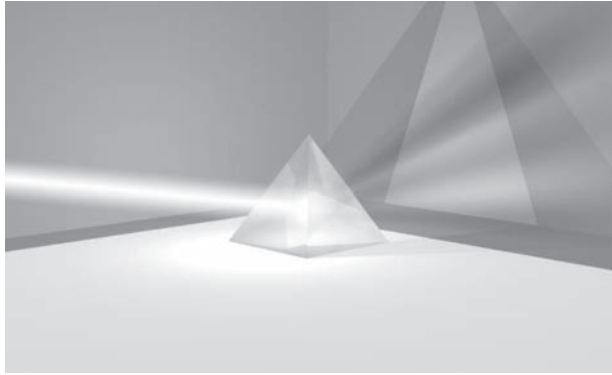


Figura 2. Dispersión de la luz por un prisma, se observa la descomposición de la luz blanca en los diferentes colores del espectro visible^[3].

Regresando al debate inicial sobre la naturaleza de la luz como partícula u onda, a principios del siglo XIX, Francesco Grimaldi hizo pasar un rayo de luz por una ranura estrecha donde observó que la luz se dispersaba del otro lado, es decir la luz se esfumaba gradualmente, y no de golpe, fenómeno óptico que nombró difracción de la luz. Este fenómeno se presenta siempre que de la luz emitida por una fuente se separa una fracción interponiendo un cuerpo opaco y esto es lo que da origen a su nombre: división en fracciones.

Hacia 1665, Newton realizaba experimentos tratando de explicar la razón de que las burbujas del jabón, formadas por un líquido incoloro, tuvieran los brillantes colores en su superficie. Considerando que ello podría deberse a la cercanía de las superficies interior y exterior de la burbuja, colocó una lente convexa, muy delgada, sobre una pieza de vidrio. Observando alrededor del punto central de contacto una sucesión

de círculos de colores: negro, azul pálido, blanco, naranja, rojo, verde, amarillo, etc., además si iluminaba el vidrio con una luz de un color definido, obtenía anillos del color de la luz alternados con anillos negros, la distancia de separación entre los anillos dependía del color, por ejemplo anillos azules estaban más cercanos uno del otro que los rojos, este experimento se denominó anillos de Newton, y fueron motivo constante y general de extrañeza hasta 75 años después de su muerte, cuando Thomas Young, científico inglés, partidario de la teoría ondulatoria, dedujo que si la luz se movía de manera similar a las ondas en el agua, tenía que producirse cierta acción recíproca al que sucede al juntarse dos ondas. Si iban al mismo ritmo, se combinarían para formar una onda más grande. Si su movimiento era arrítmico, de tal forma que el máximo de la onda coincidía con el mínimo de la otra, dos ondas de igual intensidad se cancelarían mutuamente.

Young hizo un ingenioso experimento para demostrar su hipótesis. Sabía que si se enfocaba una fuente de luz de un solo color hacia una lámina opaca (en la que se hubieran abierto dos rendijas), la luz que pasaba por la abertura se difundía al reflejarse en la pantalla, según demostró Grimaldi con su experimento de la difracción. Si las dos aberturas estaban lo bastante cercanas, los rayos de luz resultantes se sobreponían en la pantalla.

Lo que Young observó en la pantalla fue una serie de líneas brillantes y oscuras, conocidas actualmente como patrón de interferencia, producidas por la cancelación y refuerzo de las ondas que llegaban en diferentes momentos. Este experimento sirvió de apoyo a la teoría ondulatoria de la luz.

Al hablar de la luz, se puede expresar el fenómeno como longitud de onda o frecuencia, donde la longitud de onda es la distancia entre los máximos de dos ondas y la frecuencia es el número de tales ondas que pasan por cierto punto en un segundo. La relación directa entre la velocidad, longitud de onda y frecuencia de las ondulaciones es que el producto de las dos últimas es igual a la velocidad. En el caso de la luz, la velocidad es constante, cualquiera que sea su medio.

Cuanto mayor sea el número de ondas acumuladas en un segundo, menor será la distancia que tendrán que recorrer y, por lo tanto, menor

será la longitud entre una y otra. Esto explica la relación entre la longitud de onda y la frecuencia: si la frecuencia se duplica, la longitud de onda se reduce a la mitad, y viceversa.

Dado que existen diversas longitudes de onda es fácil relacionar esta variedad a la diversidad de colores que existen. Los experimentos de Young no sólo sirvieron para determinar la relación de la longitud de onda y la frecuencia con el color, sino que explicaron el fenómeno de los anillos de Newton y la variedad de los colores de las burbujas de jabón. En ambos casos es debido a que existen dos superficies reflectoras muy cercanas una de la otra. En ambos, las diferentes longitudes de onda se refuerzan y se anulan mutuamente.

Además, el experimento de Young permitió explicar la difracción, y por qué las sombras no tienen un contorno muy definido. Para comprenderlo es necesario conocer que la luz se propaga en todas direcciones, conocido en la actualidad como incoherencia de la luz.

Otro aspecto importante de la luz es la polarización. Las ondas de luz vibran normalmente en tres dimensiones. No obstante, ciertos materiales traslúcidos tienen curiosos efectos sobre la luz que la atraviesa, las ondas se ven reducidas a una forma bidimensional. Este fenómeno se observó por vez primera en el siglo XVII. El cambio en el movimiento de las ondas de luz se produce debido a la estructura molecular de la sustancia.

Si colocamos dos cristales con la misma estructura molecular frente a frente en una posición, dejarán libre paso a la luz. Pero si uno de ellos cambia de posición, disminuirá la luz hasta que, llegado a determinado punto, no pasará por el segundo. Es por este sencillo principio que los anteojos reducen la luminosidad.

Estas observaciones hicieron predominante a la teoría ondulatoria. Ninguno de los experimentos de la teoría corpuscular habían servido para explicar los fenómenos de interferencia o difracción, que no son sino distintos aspectos del mismo fenómeno.

Para mediados del siglo XIX los investigadores habían deducido las leyes físicas que rigen el comportamiento de la luz, estableciendo definitivamente su carácter ondulatorio, pero sin aclarar básicamente

que es la luz. James Clerk Maxwell, físico escocés, identificó la luz como parte de un vasto y continuo espectro de radiaciones electromagnéticas.

Toda radiación electromagnética, incluida la luz, avanza por un vacío precisamente a la misma velocidad, exactamente 299.792,458 km/s, investigaciones han demostrado la vasta gama del espectro electromagnético, donde hay longitudes kilométricas de onda en el extremo de baja frecuencia de la escala del radio, hasta fracciones de milímetro en el extremo superior, el de los rayos gamma.

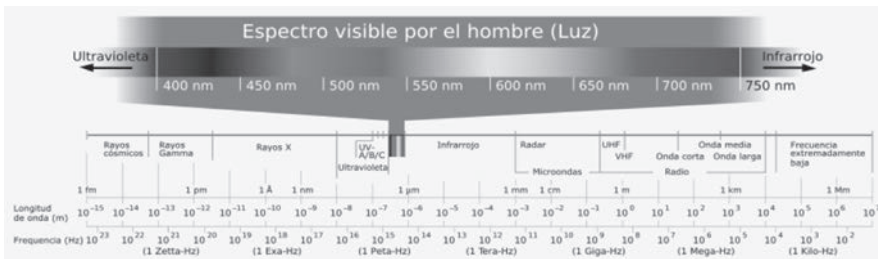


Figura 3. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda y frecuencia^[3].

En 1887 se había observado que una placa de zinc limpia, expuesta a la luz ultravioleta, adquiere una carga positiva. Philipp Eduard Anton von Lenard, físico alemán, explicó en 1900 este efecto. Literalmente, la luz ultravioleta expulsaba electrones de la placa de zinc. Con la pérdida de estas partículas de carga negativa, el zinc adquiriría una carga positiva. Otros investigadores descubrieron muy pronto que el llamado era común en los metales. Además, el número de electrones expulsados en un segundo estaba en proporción con la intensidad de la radiación de la luz, (actualmente, se puede observar este efecto en los sensores de los dispositivos que abren o cierran las puertas automáticamente de centros comerciales, en las cámaras de video que captan y almacenan imágenes del exterior, en los dispositivos de control remoto de los diferentes aparatos eléctricos que se utilizan en la actualidad).

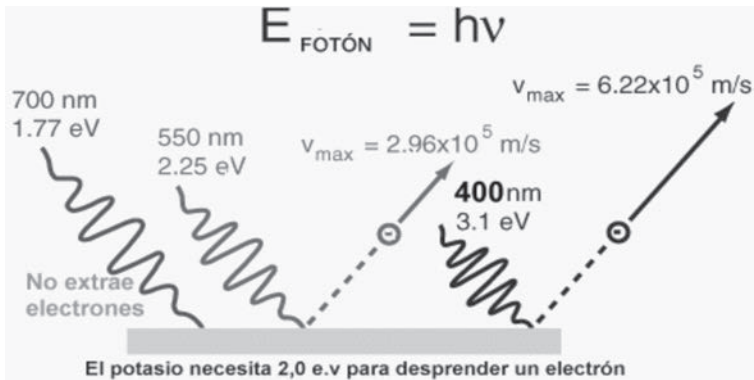


Figura 4. Diagrama del efecto fotoeléctrico. Los fotones incidentes, con diferentes energías, son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de éste.

Otra observación realizada fue que los electrones expulsados del metal tenían diverso grado de energía, donde la energía máxima de los electrones expulsados no la determinaba la intensidad de la luz, como se esperaría de la teoría ondulatoria, sino que dependía de su longitud de onda. Por lo que un haz de longitud de onda corta expulsaba electrones de alta potencia, mientras que un haz de longitud de onda mayor producía electrones de menor potencia. Así, la intensidad del haz afectaba al número de electrones expulsados por segundo, pero no a su energía máxima.

En 1905, Albert Einstein científico alemán, aplicando la teoría de los cuantos de Max Planck, lanzó el postulado de que la teoría ondulatoria quizá estuviera incompleta, es decir la luz pudiera tener características de una partícula. Einstein elaboró una imagen matemática de cómo era posible que el electrón de un metal absorbiera una pequeñísima fracción de energía de la luz, que nombro cuanto de luz (conocido en la actualidad como fotón), lo que le daría suficiente energía para escapar. Además, si la energía del fotón estuviera en proporción inversa a la longitud de onda, las ondas cortas darían a los electrones expulsados el alto grado de energía observado por Philipp Lenard.

Para 1923, el físico norteamericano Arthur Holly Compton había demostrado que los fotones tienen impulso y, en consecuencia, masa, lo que fortaleció la teoría de Einstein. Si bien desde 1895 se tenían estudios realizados por Wilhelm Conrad Röntgen físico alemán, sobre los rayos X y se había demostrado su índole ondulatoria, también que las partículas tienen gran poder de penetración, lo que permitió usarlos para tomar fotos a través de materias opacas a la luz. Las partículas que formaban los rayos X, y su alta potencia, quedaban explicadas con la teoría de los fotones. Se hicieron otros experimentos que demostraron que cuando la luz y materia actúan recíprocamente, muchos fenómenos sólo pueden explicarse si se considera la luz como porciones aisladas de energía.

A partir de estos fenómenos, que no se podían explicar con la teoría ondulatoria y sí con la corpuscular, surgió la llamada mecánica cuántica, elaborada conjuntamente por algunos de los más grandes físicos modernos como Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Einstein, Dirac, Von Neumann, entre otros. La teoría demuestra cómo la radiación electromagnética puede tener características ondulatorias y corpusculares, predominando en ocasiones una y otras veces la otra.

Así pues, la luz no es sino un pequeño fragmento visible del espectro electromagnético. Está formada por ondas, tanto como por partículas, siendo estas dos cualidades aspectos complementarios de una misma realidad.

Conceptos básicos

A continuación se definen y clasifican los métodos ópticos de análisis y se exponen los principios fundamentales en los que se basan.

Se definen como métodos ópticos de análisis aquellos que miden la radiación electromagnética que emana de la materia o que interacciona con ella. Se incluyen, por lo tanto, todos los campos del espectro electromagnético desde los rayos gamma a las ondas de radio. También se estudian todas las formas de obtención de radiación electromagnética, así como su interacción con la materia, incluyéndose la emisión, la absorción, la dispersión (scattering), la refracción, la dispersión refractiva (dispersión), la

reflexión, las interferencias, la difracción y la polarización, y se describen los métodos basados en cada uno de estos mecanismos.

Resulta adecuado dividir los métodos ópticos de análisis en dos tipos fundamentales, los espectroscópicos y los no espectroscópicos. Los métodos espectroscópicos se basan en la medida de la intensidad y la longitud de onda de la energía radiante. La característica común a todos los métodos espectroscópicos es que se miden espectros y además, que estos espectros son debidos a transiciones entre estados de energía característicos. Por otro lado, los métodos no espectroscópicos no miden espectros ni están relacionados con las transiciones entre estados de energía característicos sino que se basan en una interacción entre la radiación electromagnética y la materia que produce como resultado un cambio en la dirección o en las propiedades físicas de la radiación electromagnética. Los mecanismos específicos de interacción que intervienen en los métodos no espectroscópicos son la refracción, la reflexión, la dispersión refractiva, la dispersión, las interferencias, la difracción y la polarización. Son ejemplos de técnicas no espectroscópicas la refractometría, la difracción de rayos X y la polarimetría. Los métodos ópticos más utilizados son los espectroscópicos y en la mayoría de ellos el mecanismo de interacción se basa en la absorción o emisión de energía. Los métodos espectroscópicos se identifican fácilmente ya que llevan el prefijo espectro^[4].

Métodos ópticos no espectroscópicos

Existen diferentes características por las cuales la energía del sol no llega completamente a la superficie terrestre, algunas de estas características dependen de las propiedades de las sustancias presentes en la atmósfera, las cuales pueden generar procesos de dispersión, absorción y reflexión de radiación solar.

Debido a lo anterior, existe una manera de medir la tendencia de una superficie a reflejar la radiación incidente, conocida como Albedo, la cual es expresada en porcentaje, y expresa la razón de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la tierra es del 30-32%

de la radiación que proviene del sol. En el caso de la atmósfera englobaría a nubes, procesos de difusión y reflexión de la superficie terrestre.

La atmósfera hace que gran parte de la energía de longitudes de onda corta se absorba, pero debido al movimiento de rotación de la Tierra, ésta hace que no se absorba en todas las zonas por igual, es decir la absorción es diferente en los polos que en el ecuador.

En la figura 5, se presentan los principales fenómenos que modifican la radiación de energía procedente del Sol, como nubes, árboles atmósfera, suelo, entre otros.

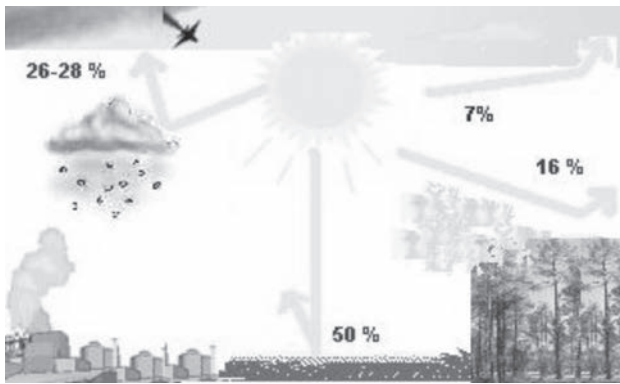


Figura 5. Presentación en porcentajes de algunos de los fenómenos que modifican la radiación solar^[5].

Existe un fenómeno que dispersa la radiación proveniente del sol en diferentes direcciones, provocado por las partículas diminutas presentes en la atmósfera, pero sin modificar la longitud de onda, conocido como dispersión atmosférica, la cual puede ser de dos tipos: selectiva y no selectiva.

La dispersión atmosférica selectiva se debe a partículas pequeñas, las cuales dispersarán más las longitudes de onda cortas que las de longitud de onda mayores, lo anterior es conocido como Dispersión Rayleigh.

La dispersión de Rayleigh (en honor a Lord Rayleigh) se debe a partículas mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos y líquidos transparentes, pero se

ve con mayor frecuencia en los gases. La dispersión de Rayleigh de la luz solar en la atmosfera es la principal razón de que el cielo sea azul.

La dispersión atmosférica no selectiva se debe a partículas grandes, de diámetros mayores que la longitud de onda del haz de radiación incidente. Se denomina dispersión por partículas grandes o Dispersión Mie.

En la atmósfera existen gran cantidad de partículas en suspensión que poseen tamaños superiores a las longitudes de onda solares: aerosoles, gotitas de agua, polvo, partículas volcánicas, etc. Gustav Mie, físico alemán, descubrió en 1908, el efecto de dispersión que hoy en día lleva su nombre. Para moléculas o partículas grandes la luz es dispersada, preferentemente, en la misma dirección de incidencia, de forma que, la molécula en suspensión tiende a dispersar la luz en la misma dirección en la que incidió. La dispersión de Mie no depende tanto de la longitud de onda incidente como en la de Rayleigh. Cuando observamos las nubes poco espesas, tipo niebla o neblina, vemos que estas son blancas y no azules, esto es, las partículas acuosas no dispersan la luz selectivamente.

Por lo anterior se deduce que la cantidad de radiación dispersada depende de la longitud de onda de la radiación y del tamaño de las partículas presentes.

En la naturaleza, los colores que conocemos son debidos a la luz blanca proveniente del sol incidiendo sobre los objetos, los cuales reflejan los colores propios de las características de éstos, así un objeto que es iluminado por un haz de luz absorbe todos los colores y refleja el color del espectro correspondiente a la onda emitida por el pigmento que posee en su superficie. Analizando este fenómeno podríamos deducir que los objetos son de todos los colores, menos del color que reflejan.

Los colores que muestra el espectro son la combinación de los colores primarios, que no incluyen el blanco ni el negro, pues éstos se consideran valores. El blanco estaría indicando presencia de luz y el negro ausencia de luz.

Las moléculas gaseosas que componen la atmósfera son capaces de absorber gran parte de la radiación electromagnética procedente del sol, ese es el motivo de que esa radiación no llegue a la superficie de la tierra.

La atmósfera terrestre, deja pasar radiación electromagnética de

baja energía, como la luz visible y las ondas de radio pero no deja pasar la radiación más energética como la radiación UV-B, rayos gamma, rayos X que son radiación de longitud de onda corta.

Otro fenómeno interesante es el de reflexión, el cual se produce siempre que incide radiación en la interfase entre dos materiales de índice de refracción distinto. La calidad de la superficie tiene gran relación con la naturaleza del fenómeno. Así, si la superficie es lisa (como en un espejo) el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, en cambio, las superficies irregulares dan lugar a reflexiones difusas (cuando no se conserva la imagen, pero se refleja la energía), un tipo de reflexión que tiene poco interés desde el punto de vista óptico. Además, si la superficie de separación es entre un medio dieléctrico y uno conductor, o entre dos medios dieléctricos, la fase de la onda reflejada eventualmente podría invertirse. En general, sea cual sea el ángulo de incidencia y el tipo de superficie, el haz reflejado difiere del haz incidente en la intensidad total, en el estado de polarización y en la fase. Además, si coexisten varias frecuencias, se presentan también, en general, diferencias cromáticas en la radiación reflejada. Ejemplos comunes incluyen la reflexión de la luz, el sonido y las ondas de agua.

En el proceso de reflexión parte de la radiación solar incidente es absorbida por la superficie terrestre y parte es reflejada, éste fenómeno dependerá de las propiedades del medio.

Así, elementos como la hierba, bosques, tierra y agua, reflejan menos del 10 % de la radiación incidente, pero elementos como la nieve fresca pueden reflejar el 80% de la radiación incidente.

La reflectividad de algunas superficies como la arena va del 35 al 45%, el de la vegetación herbácea es del 15 al 25%, el de los bosques de hoja caduca va del 5 al 10%, entre otros.

El sol emite radiación que abarca todo el espectro electromagnético, desde longitudes de ondas largas pertenecientes al infrarrojo, visibles, ultravioletas, rayos X, rayos gamma, radiación cósmica, etc. Parte de la radiación que emite el sol, es absorbida por la atmósfera terrestre, y otra parte, la emite la tierra hacia el espacio.

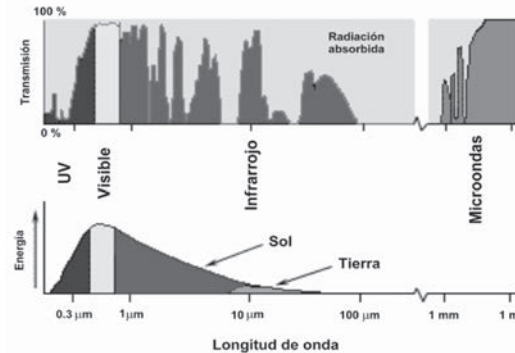


Figura 6. Transmisión y emisión de energía del sol y la tierra a diferentes longitudes de onda^[5].

En la figura 6, se representa la energía que emite el sol y la tierra a diferentes longitudes de onda. Se puede observar que la máxima emisión por parte del sol comprende la zona del visible, aunque también emite en gran cantidad en la zona del infrarrojo y en la zona del ultravioleta. Por parte de la tierra se observa que emite principalmente en la zona del infrarrojo térmico.

En la figura 6, en la parte superior de la gráfica se representa la transmisión a través de la atmósfera y se puede observar que la zona de color gris corresponde con la radiación absorbida por parte de la atmósfera, por lo que se hace patente que la radiación correspondiente a la región visible del espectro, se transmite completamente, y por tanto llega a la tierra.

En el análisis de la propagación de la luz en diferentes medios, se observan diferentes características que proporcionan información del medio, así por ejemplo, la refracción es la base de la refractometría, y puede definirse como el cambio de dirección de la radiación al pasar, de un material a otro, y puede atribuirse a las diferencias de velocidad en los dos medios. Siempre que la radiación pasa de un material dieléctrico a otro es parcialmente reflejada y parcialmente refractada (o transmitida), tal como se observa en la figura.

La energía reflejada aumenta cuando la diferencia de velocidad entre los dos medios aumenta, y ésta es a su vez superior cuanto mayor sea la diferencia de densidad entre los dos medios.

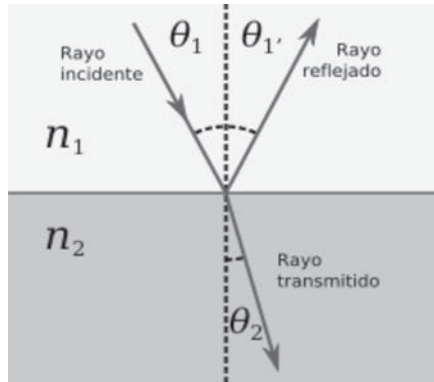


Figura 7. Representación de la ley de Snell, en donde se observa un haz de luz incidiendo a un ángulo θ_1 , el cual es reflejado al mismo ángulo y transmitido a un ángulo diferente que depende del índice de refracción n_2 del medio^[3].

Una ley de refracción útil es la ley de Snell, utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de índice de refracción distinto.

La ley de Snell representa el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia el cual es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios. Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medios en los que la velocidad de propagación de la onda varíe.

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta \quad (1)$$

La razón por la cual los prismas permiten descomponer la luz en función de sus longitudes de onda, radica en que la velocidad de la radiación en un medio determinado depende de su longitud de onda. De la ecuación anterior, puede deducirse que los mejores prismas serán los de materiales de índice de refracción elevados, lo cual se cumple siempre que el material del prisma no absorba las longitudes de onda de interés.

Otro análisis, es realizado según la ley de Malus, así llamada por su descubridor, el físico francés Étienne-Louis Malus, el cual indica que la

intensidad de un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa un polarizador perfecto equivale al producto de la intensidad de la luz antes de pasar por dicho polarizador y al cuadrado del coseno del ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente.

$$I = I_0 \cos^2 \theta_i \quad (2)$$

A partir del conocimiento de la polarización de la luz, surge el polarímetro el cual es un instrumento que sirve para determinar el valor de la desviación de la luz polarizada por un material ópticamente activo (enantiómero). A partir de un rayo de luz, a través de un filtro polarizador obtenemos un rayo de luz polarizado plana, que al pasar por un portamuestras que contiene un enantiómero en disolución, se desvía. Según la orientación relativa entre los ejes de los dos filtros polarizantes, la luz polarizada pasará por el segundo filtro o no. Lo anterior se debe a que el plano de la luz polarizada girará al pasar a través de esta sustancia y, por lo tanto, el segundo prisma deberá ser colocado en una posición ligeramente diferente al primero para observar luz. La diferencia entre la posición del primero y la del segundo indica el poder rotatorio de la muestra analizada y a partir de este valor se pueden calcular diversas características de la sustancia.

Otro instrumento de medición basado en el principio de polarización es el sacarímetro o analizador de penumbra, el cual es un instrumento utilizado para medir la desviación introducida en el eje de vibración de la luz linealmente polarizada al atravesar una sustancia ópticamente activa, ya que el sacarímetro mide la concentración de azúcar y debido a la estructura molecular de esta sustancia, las soluciones rotan el plano de polarización de la luz plana polarizada mientras pasa la luz a través de ellas. La rotación del plano de polarización cuando la luz incidente es vista puede ser a la derecha (sentido horario) o a la izquierda (sentido antihorario).

Otro método de caracterización es basado en la ley de Beer-Lambert, en donde la relación entre la absorción de la luz por una solución diluida o por un gas y la concentración de la fase absorbente viene dada por la ley de Beer, mientras que la relación entre la absorción de la luz

y el camino recorrido por ésta (o sea, el espesor de la cubeta de prueba) viene dada por la ley de Lambert. Por lo cual es conveniente considerar ambas leyes conjuntamente.

Para deducir la ecuación que se busca se postula, en primer lugar, que cada cuanto de luz que penetra en la solución tiene igual oportunidad de ser absorbido. Esto implica que la luz es monocromática. En segundo lugar, se postula que cada molécula de la sustancia que absorbe tiene igual oportunidad de interceptar y absorber un cuanto de luz, cualquiera que sea su situación dentro de la cubeta. Esto implica que la solución es suficientemente diluida para que ninguna molécula quede oculta en la sombra de la otra.

Considerando un haz de luz de intensidad I_0 que penetra en una cubeta llena de una solución de concentración c . Después de haber atravesado una distancia x dentro de la cubeta, la luz tendrá una intensidad I . Cuando haya atravesado una distancia adicional infinitamente pequeña, dx , la intensidad será $I+dI$. (Evidentemente, el incremento dI es negativo; la luz se debilita al atravesar la célula.) Se tiene

$$\frac{dI}{I} = -kcdx \quad (3)$$

En óptica, la ley de Beer-Lambert, también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado.

En resumen, la ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos l y α , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida.

La ley tiende a no ser válida para concentraciones muy elevadas, especialmente si el material dispersa mucho la luz.

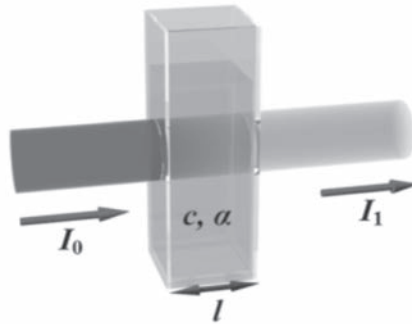


Figura 8. Diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una cubeta de tamaño l , que contiene un elemento con una concentración c ^[3].

El investigador nunca debe admitir a priori que las soluciones con que trabaja obedecen la ley de Beer. Lo que se tiene que hacer siempre es medir la absorbancia de tres o cuatro soluciones patrón de concentración conocida, (y mejor, de un mayor número de estas soluciones) y representar gráficamente los valores leídos de absorbancia en función de la concentración. Idealmente, esta gráfica debe ser una recta que pasa por el origen ($A=0$ cuando $c=0$). Pero si los propios reactivos puestos para producir el color absorben luz, o si contienen impurezas, la absorbancia A podrá ser distinta de cero cuando la concentración (puesta) sea cero. Ocurre muchas veces, que este gráfico de calibrado no es rectilíneo más que a concentraciones bajas, curvándose a concentraciones mayores hacia un lado u otro de la recta ideal, dando lugar a desviaciones positivas o negativas. Son varios los factores que pueden originar estas desviaciones de la ley de Beer, siendo los más comunes:

Empleo de luz no monocromática, al deducir la ley de Beer se postuló que cada cuanto de luz tiene igual probabilidad de ser absorbido. Ello no será cierto, en general, si los cuantos de luz que penetran en la solución tienen energías diferentes, esto es, si la luz no es monocromática. Ahora bien, la luz verdaderamente monocromática es un ideal, al que cabe aproximarse, pero que no es posible realizar; la luz que penetra en la solución contiene siempre radiaciones de longitudes de onda diversas comprendidas de un cierto intervalo, siendo este intervalo muy pequeño en unos casos y más amplio en otros^[6].

Asociación o disociación de las especies absorbentes de luz. Ocurre a veces que la concentración de las moléculas que realmente absorben luz no es igual a la concentración total de la sustancia que se desea determinar. En tales casos puede suceder que la concentración de la sustancia absorbente no aumente o disminuya proporcionalmente a la concentración total.

Métodos ópticos espectroscópicos

En gran medida la química de la atmósfera requiere del estudio de la interacción de la luz procedente del sol con las moléculas que conforman las diferentes regiones de la atmósfera.

Los procesos que tienen lugar en la atmósfera son muy variados, aunque los procesos fotoquímicos son los más importantes. La formación de radicales mediante procesos de fotólisis forman una variada gama de éstos, cuya descripción y explicación es precisa para comprender la física y química atmosféricas.

De esta forma la espectroscopía, al igual que la fotoquímica es fundamental para la comprensión de la química atmosférica.

Buena parte de las moléculas de interés atmosférico son moléculas sencillas, oxígeno, nitrógeno, ozono, aunque otras sean más complejas como hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles.

La espectroscopía molecular precisa de la infraestructura de la mecánica cuántica la descripción de la materia y la interacción de la radiación con ella y, en casos, el tratamiento cuántico de la radiación. Las técnicas desarrolladas son muy variadas y algunas de ellas no exentas de sofisticación. En general, las espectroscopías de rotación, vibración rotación y electrónica configuran el mayor porcentaje de cobertura para el estudio y tratamiento de la química atmosférica.

Desde un punto de vista histórico la región del espectro visible es la primera que se conoció y se ha utilizado a partir de las primeras mediciones cuantitativas de la transmisión de la luz efectuadas por Bouguer en 1729. La región infrarroja fue descubierta por Herschel en 1800, pero no fue utilizada con fines analíticos hasta los trabajos de Julius en 1892, y de un modo sistemático hasta la década de 1920. La región ultravioleta

leta fue descubierta por Ritter en 1801 pero no fue utilizada analíticamente hasta la década de 1920, y su desarrollo y uso rutinario no ha tenido lugar hasta 1940. Las demás regiones del espectro se han utilizado analíticamente más recientemente y en general, su uso es mucho menor que la región de los 200nm a los 25 μ m. Es una excepción la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (rmn) en la región de la radiofrecuencia, que ha experimentado un desarrollo extraordinario desde que se efectuaron los primeros experimentos en 1945 y que se ha convertido en uno de los métodos más importantes para la elucidación de estructuras orgánicas.

La espectrofotometría es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones biológicas. El espectrofotómetro es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia.

Todas las sustancias pueden absorber energía radiante, aun el vidrio que parece ser completamente transparente absorbe longitud de ondas que pertenecen al espectro visible; el agua absorbe fuertemente en la región del infrarrojo.

La absorción de las radiaciones ultravioleta, visibles e infrarrojas depende de la estructura de las moléculas, y es característica para cada sustancia química.

Cuando la luz atraviesa una sustancia, parte de la energía es absorbida; la energía radiante no puede producir ningún efecto sin ser absorbida.

El color de las sustancias se debe a que éstas absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y sólo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbidas.

La espectrofotometría proveniente del sol, es decir la radiación ultravioleta-visible usa haces del espectro electromagnético y radiaciones del campo UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm y usa haces de luz visible de 400 a 800 nm, por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta y visible del espectro.

Al campo de luz UV de 200 a 400 nm se le conoce también como rango de UV cercano, la espectrofotometría visible solamente usa el rango del campo electromagnético de la luz visible, de 400 a 800 nm.

A este tipo de técnicas se conoce en conjunto como técnicas fisico-bioquímicas, en relación a la espectrofotometría se tiene una ley muy importante, la ecuación de Beer-Lambert.

La ecuación simplificada de la ley de Beer-Lambert comprende a la *mínima* ecuación que relaciona la concentración, la absorbancia de la muestra y el factor de calibración. El factor de calibración relaciona la concentración y la absorbancia de los estándares.

Un modo de aumentar la exactitud de las determinaciones fotométricas, especialmente en los casos en que las soluciones presentan fuerte absorbancia, consiste en comparar la intensidad de la luz que pasa por la solución con la intensidad de un haz de luz de la misma lámpara o foco luminoso, que atraviesa una segunda solución cuya concentración es conocida exactamente y que es un poco menor que la de la muestra que se determina. Esto se puede realizar fácilmente: basta con colocar la segunda solución o solución de referencia en el recorrido del haz luminoso y ajustar el medidor para que dé una lectura del 100 por cien de transmitancia. Entonces se sustituye la solución de referencia por la solución problema y se leen la transmitancia y la absorbancia aparentes.

Sea I_0 la intensidad de la luz antes de pasar por la cubeta. Sean I_1 la intensidad de la luz que emerge de la solución problema e I_2 la de la luz que emerge de la solución de referencia. Sean c_1 y c_2 las concentraciones de ambas soluciones. Se verifica:

$$\log I_1 = \log I_0 - kc_1 \quad (4)$$

$$\log I_2 = \log I_0 - kc_2 \quad (5)$$

Donde k es el producto de la absorbividad molar por el espesor de la cubeta, igual para ambas soluciones. Resulta evidente que:

$$\log \frac{I_1}{I_2} = k(c_2 - c_1) \quad (6)$$

Así, el espectrofotómetro mide ahora la diferencia entre las dos concentraciones y un error en la medida de esta diferencia dará lugar a un error relativo menor en la medida de c_1 .

En la práctica no se mide nunca I_0/I , sino que primero se coloca una cubeta con el disolvente puro en la trayectoria del haz, luego se coloca otra cubeta con la solución problema en dicha trayectoria y se comparan las intensidades de los dos haces luminosos emergentes. El I_0 utilizado al aplicar la ley de Beer, es en realidad la intensidad de la luz transmitida por la cubeta que contiene disolvente puro. De esta forma se compensa la luz que se pierde por reflexión en las superficies de las paredes de la cubeta^[7].

Aplicaciones

En la actualidad existen una gran variedad de técnicas de medición de contaminación, las cuales han sido desarrolladas y aplicadas para entender la interacción de emisiones gaseosas en escala local y global. Sin embargo, estas emisiones se diluyen rápidamente en la atmósfera bajo condiciones de flujo no estacionarios, las concentraciones de varios de estos gases son extremadamente bajas, en algunas ocasiones por debajo de niveles de una parte por millón (ppm), lo cual significa un reto tecnológico y científico importante.

Se pueden encontrar una gran variedad de reportes científicos con experimentos para la detección de estos gases. Básicamente, para medir la presencia de ciertos gases en la atmósfera, es importante tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Determinar las fuentes principales de contaminación (tráfico, agricultura e industria)
- El origen de las fuentes de emisión (procesos industriales resultan en diferentes fuentes puntuales)

Mediante el monitoreo del entorno, se pueden optimizar estrategias de control de contaminación por gases, y así reducir las emisiones.

Tradicionalmente, las emisiones de gases son medidas y monitoreadas utilizando métodos químicos de contacto, donde el gas es extraído desde el punto de medición y manipulado para su medición y caracterización, las muestras son sujetas a una reacción química específica, para la detección y concentración de las mismas. Sin embargo, existen diferentes desventajas asociadas con esta técnica^[8]:

- Debido a las extremadas bajas concentraciones de gas es necesario muestrear por largos periodos de tiempo, dependiendo del tipo de gas de interés en ocasiones horas, antes de obtener una medición aceptable.
- Existen muchas fuentes de error relacionadas a la extracción y manipulación del gas, y en general el proceso será laborioso y tomará mucho tiempo.
- Existen además problemas particulares como en gases que son fácilmente absorbidos en la superficie. Como consecuencia una gran cantidad de este es perdido en el proceso de extracción y manipulación para su estudio, por lo que la cuantificación resulta en una tarea difícil. Afortunadamente, una pequeña cantidad de gases contaminantes son de este tipo, por ejemplo HCl, HF y NH₃.

Existen diferentes técnicas ópticas para la caracterización, detección y control de gases, a continuación se describen algunas de estas.

Técnica DOAS (espectroscopía de absorción óptica diferencial)

La presencia y el comportamiento de muchos gases traza, presentes en la atmósfera (óxidos de nitrógeno, ozono, óxido de azufre, etc.) se pueden investigar por medio de la espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS). Así, a través del espectro de absorción específico de cada molécula se puede concluir su presencia y cuantificar la misma.

Los compuestos atmosféricos se han medido, tradicionalmente, empleando técnicas químicas. El ozono se ha medido burbujeando aire a través de una disolución conteniendo yoduro, y el elemento resultante que se forma se mide utilizando técnicas químicas. Pero los métodos químicos están sujetos potencialmente, a muchas interferencias que, en el caso del ozono, por ejemplo, pues son todos aquellos compuestos que interfieren en la oxidación del yoduro, como el SO₂, que provocará una interferencia negativa, mientras que el NO₂ también interferirá, pero, ahora, positivamente. Así las cosas, debido a que el método no es específico del O₃, los datos obtenidos con este método de determinación se suelen referir en la literatura como “oxidante”, más que como ozono, aunque sea este último el que contribuye en mayor grado.

Todos los métodos tradicionales, se siguen empleando, hoy día, con más precaución y precisión, aunque se han abierto paso métodos instrumentales, entre los cuales, los espectroscópicos ocupan un lugar muy destacado. El hecho de que las medidas que se llevan a cabo son en el propio medio, la atmósfera, tanto a nivel troposférico como estratosférico, es preciso desarrollar técnicas sofisticadas, que, normalmente, van acompañadas por modelos descriptivos y aproximaciones dinámicas de la propia atmósfera.

La técnica DOAS ocupa un lugar, especialmente destacado, entre las técnicas instrumentales espectroscópicas empleadas en la detección de contaminantes en la atmósfera, reconocida como método de referencia para control de la calidad del aire. NO_2 , O_3 y SO_2 tienen al DOAS como método de referencia para el control de los contaminantes gaseosos en la atmósfera por la Agencia de Protección ambiental de USA.

En las regiones UV y visible se absorben muchos de los gases de interés atmosférico y ello representa una limitación que nos obliga a distinguir entre cada una de las distintas especies, así como de la absorción del fondo y la dispersión Rayleigh y Míe de los mismos gases y de las partículas presentes en la atmósfera. Esto obliga a una primera restricción que consiste en aplicar la espectroscopía UV-visible a aquellas especies cuya estructura de bandas tiene una anchura de banda de 5 nm o inferior, siendo esta restricción soportada por la técnica denominada DOAS o espectrometría de absorción óptica diferencial.

Una de las ventajas más importantes del DOAS es la elevada sensibilidad cuando los compuestos presentan bandas de absorción estrechas en la región espectral UV-visible.

Es preciso disponer de un espectro de absorción a efectos de calibrado para poder ajustar los espectros DOAS de los compuestos a estudiar. Como en todos los calibrados, deben llevarse a cabo con el mismo instrumento y en las mismas condiciones que vamos a utilizar, aunque, naturalmente siempre que se conviertan resolución y condiciones de medida, podremos emplear espectros aportados en la literatura.

En el proceso de cuantificación es habitual emplear procedimientos de mínimos cuadrados lineales como no lineales para ajustar las intensidades medidas a las de los espectros de referencia escalados, minimizando la absorbancia residual.

De la figura 9, se observa que la fuente de luz utilizada es una fuente de banda ancha, como por ejemplo una lámpara incandescente de iodo cuarzo, o una lámpara de alta presión de Xe, o un láser de banda ancha, o el propio sol a la luna. La luz atraviesa la muestra de aire, en un solo paso o en varios pasos a través de una célula abierta. La luz que ha pasado a través de la muestra alcanza la ventana de entrada de un espectrofotómetro, cuya misión es llevar a cabo una dispersión de la luz, con objeto de poder detectar a partir de la luz dispersada con mayor precisión, al permitir seleccionar longitudes de onda con anchuras de banda más estrechas y hacerlas incidir en el detector, que bien como fotomultiplicador o matrices de fotodiodos (PDA) o con dispositivos de carga acoplados (CCD) permiten cuantificar los fotones de cada longitud de onda que lo alcanzan.

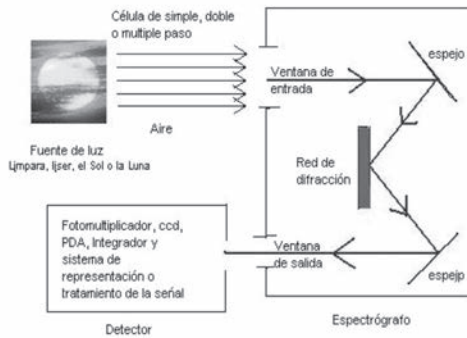


Figura 9. Esquema de un montaje instrumental DOAS.

Si se utiliza la luz del sol o de la luna como fuentes, podemos obtener una medida de la concentración presente en la columna de atmósfera situada sobre el lugar de medida, lo que supone acceder a la concentración integrada a lo largo de la columna de atmósfera. Así se han medido el NO_2 y el radical nitrato presente en la atmósfera^{[9][10]}. Estas medidas tomadas en función del ángulo cenital solar, nos proporciona información sobre la distribución vertical de las especies que absorben, para lo que es necesario situarse en condiciones libre de nubes, ya que, como es de esperar, la presencia de nubes puede aumentar de forma muy importante el camino óptico a través de la atmósfera, donde la dispersión

de Mie por las gotas de agua de las nubes, puede llegar a aumentar el camino óptico en un orden de magnitud.

En el caso de emplear el DOAS en determinaciones horizontales, o de superficie, midiendo la absorción integrada a lo largo de un camino óptico directo y extenso o caminos ópticos doblados, que dan lugar, también a caminos ópticos grandes, con lo que la sensibilidad es elevada, aunque en este último caso, las medidas se efectúan mucho más próximas al lugar de medida.

Los fotomultiplicadores y las matrices de diodos son los elementos más comunes de detección empleados.

Al igual que en la espectroscopia convencional, el prisma de dispersión se utiliza para dispersar la luz que incide en él y cambiando el ángulo, es decir, girando el prisma obtenemos las diferentes longitudes de onda que se enfocan a la ventana de salida y se llevan a incidir al fotomultiplicador. Un PDA tiene la ventaja de que registra todas las longitudes de onda simultáneamente, mejorando la relación señal/ruido, aunque, también, tiene inconvenientes derivados de que la respuesta de los pixeles no es idéntica.

En la tabla 1, se observan los límites de detección para algunos gases atmosféricos de interés obtenidos para longitudes de camino óptico de 5 km y 15 km empleando como detector una matriz de fotodiodos, que típicamente, agrupa a 1024 de ellos.

En el caso del HONO y del NO₃, es especialmente útil la técnica DOAS, porque hay una amplia variedad de métodos que se han revelado incapaces para su determinación. Como el NO₃ sufre fotólisis muy rápidamente sólo es detectable durante la noche; se emplean las bandas de 623 nm y 662 nm.

También se ha empleado el DOAS para medir el radical OH y los radicales libres BrO, ClO e IO en la atmósfera. Hay una destrucción de ozono a nivel superficial, catalizada por halógeno, creyéndose que el Br es el reactante que destruye en mayor cuantía.

Se ha detectado en la salida del sol en el Ártico y generado en laboratorio a concentraciones de 17 ppt^[11]. También se ha detectado en el Mar Muerto, en Israel, atribuyéndose a una reacción heterogénea de la sal marina.

Tabla 1. Datos que expresan la eficiencia en la detección de contaminantes de la técnica DOAS.

Compuesto	Longitud 5 km	Longitud 15 km
O ₃	0.17 - 1.4 ppb	0.2 - 0.45 ppb
SO ₂	50 - 100 ppt	16 - 33 ppt
NO ₂	100 -200 ppt	33 - 66 ppt
HCHO	200 - 500 ppt	66 - 166 ppt
HONO	30 - 60 ppt	10 - 20 ppt
NO ₃	1 - 3 ppt	0.33 - 1 ppt
OH	0.06 ppt	
ClO	1 ppt	
BrO	0.5 ppt	
IO	0.4 ppt	

Técnica TDLAS (Espectroscopía por absorción de un diodo láser sintonizable)

Todos los compuestos orgánicos, y muchos compuestos inorgánicos, presentan una fuerte absorción en la región espectral del infrarrojo (2.5-15 μm), debido a la resonancia con los modos de vibración rotacional de las moléculas. Se observan picos y bandas específicos, haciendo posible identificar diferentes compuestos químicos, y por lo tanto se hace factible distinguir entre algunas estructuras de isómeros.

El primer diodo semiconductor láser disponible comercialmente, TDLAS para análisis de gases estuvo disponible para uso en laboratorio en 1990. En la actualidad los instrumentos basados en TDLAS comerciales, prácticos y robustos, presentan características de monitoreo y medición continua de pequeñas concentraciones de cierto tipo de gases^[8].

La técnica del TDLAS está basada en los principios de espectroscopía y técnicas de detección sensibles. Las moléculas de gas absorben fotones del láser a longitudes de onda específicas de la estructura

de bandas de energía de las especies bajo investigación, y a longitudes de onda ligeramente diferentes a estas líneas de absorción no existe básicamente ninguna absorción (Ley de extinción de Beer-Lambert). Realizando un barrido de longitudes de onda del láser a través de las líneas de absorción del gas bajo análisis, y midiendo específicamente la magnitud de la absorción, se puede deducir la concentración de las moléculas del gas analizado.

Esta técnica es utilizada en investigaciones de ecosistemas y estudios atmosféricos donde se detectan y cuantifican bajas y ultra-bajas concentraciones de gases traza (frecuentemente tóxicos). En estudios de efectos ambientales puede proveer información sobre la fuente, vertedero y transporte de sustancias y puede permitir explorar gases de efecto invernadero.

El efecto que diferentes gases traza tiene sobre la atmosfera, y el clima han sido extensivamente estudiados. Probablemente, el más estudiado es el gas de efecto invernadero CO_2 y O_3 destruyendo clorofluorocarbones (CFC). Pero otros gases traza asociados con los efectos antes mencionados son CH_4 y óxidos de nitrógeno.

En la actualidad, la habilidad para cuantificar pequeñas concentraciones de gases traza, y seguir su evolución desde la fuente a su destino final es la clave de los estudios de nuestro ecosistema y atmosfera. La técnica de correlación Eddy además de resolución temporal alta (menores a ls) son requeridas para el estudio de la biósfera-atmosfera o aire, intercambio de agua de mar, medición de flujo de gas traza.

La técnica de correlación Eddy determina directamente el flujo de trazas atmosféricas a través de un plano paralelo la tierra. Esto representa un transporte instantáneo por arriba o debajo de las especies bajo investigación, interpolando un flujo neto, ideal.

Existen técnicas de campo que miden la temperatura para propósitos meteorológicos y muestreo de gases continuos. Datos micrometeorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, presión, humedad y otros factores) pueden ser almacenados junto con la señal desde el sensor de gas traza TDLAS, los cuales pueden ser analizados posteriormente.

Una variedad de investigaciones son ubicadas en la atmosfera baja (troposfera y estratosfera), como disminución de O₃, calentamiento global, cambio climático y calidad del aire, por nombrar los más comunes.

Un incremento significativo para esta tarea son los sensores basados en láseres para monitoreo *in situ* de las concentraciones de una variedad de gases traza, incluyendo CO₂, H₂O, NO, NO₂, O₃, etc. Los Instrumentos TDLAS son muy sensibles, rápidos, compactos y pueden ser completamente automatizados.

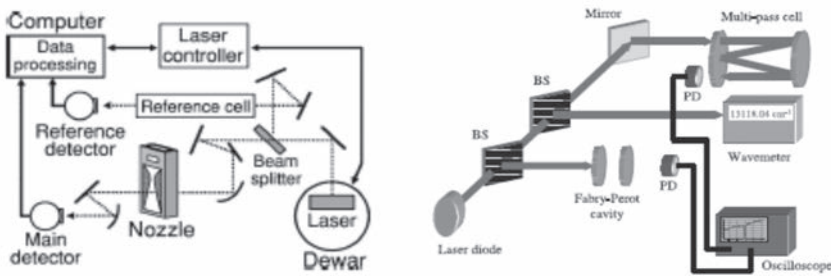


Figura 10. Dos arreglos experimentales que presentan el arreglo instrumental basado en TDLAS.

Un arreglo experimental de un sistema TDLAS puede realizarse colocando una celda de gas como su pieza central. Este muestreo analítico a través de un volumen cerrado permitirá el control de parámetros internos y externos (temperatura ambiente, presión del gas en la celda, etc.). Un Sistema de flujo de gas puede ser analizado mediante modificaciones al arreglo, para lograr dicho flujo a través de la celda, normalmente se utiliza una bomba. Esta configuración constituye un sistema de lazo abierto.

Técnica FTIR (Espectroscopía infrarroja basada en la transformada de Fourier)

La técnica FTIR es una técnica de medición donde el espectro es obtenido mediante la medición de la coherencia temporal de una fuente de radiación, utilizando mediciones en el dominio del tiempo de la radiación electromagnética o cualquier otro tipo de radiación. Esta técnica

puede ser utilizada en una gran variedad de tipos de espectroscopia incluyendo espectroscopia óptica, espectroscopia en el infrarrojo, resonancia magnética nuclear, espectroscopia de masas y espectroscopia de resonancia por giro de electrón. Existen diferentes métodos para la medición de la coherencia temporal de la luz, incluyendo la técnica de onda continua de Michelson o espectrometría por transformada de Fourier y el espectrográfo por transformada de Fourier pulsado (el cual es más sensible y tiene un tiempo de muestreo mucho más pequeño que las técnicas espectroscópicas convencionales, pero es únicamente aplicable en ambientes controlados como en un laboratorio).

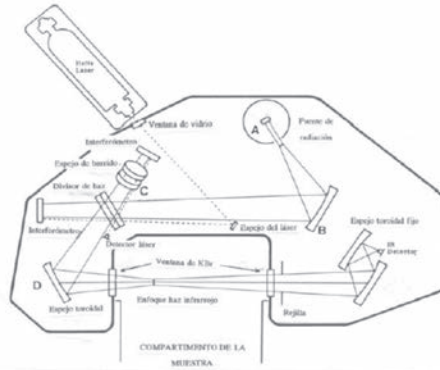


Figura 11. Diagrama de un espectrofotómetro por transformada de Fourier^[12].

En la figura 11, se muestra un esquema óptico de un espectrofotómetro basado en la transformada de Fourier. En él se observa que el rayo infrarrojo es generado en la fuente A y, posteriormente, colimado y dirigido hacia el interferómetro C por medio de un espejo fijo toroidal B.

El haz del láser de Helio-Neón sigue a la radiación infrarroja a través del interferómetro con objeto de determinar el desplazamiento del espejo móvil y para conocer la longitud de onda a la que se produce la absorción de radiación.

A la izquierda del compartimento de la muestra se encuentra un espejo toroidal ajustable D que conduce el rayo procedente del interferómetro a la muestra. Desde el compartimento de la muestra el rayo llega, a través de una rendija, a un detector térmicamente estable de tantalato de litio.

El interferómetro, que sustituye al tradicional monocromador, es la parte esencial de este aparato, pues es el encargado de modular cada frecuencia del infrarrojo con el fin de realizar la transformada de Fourier.

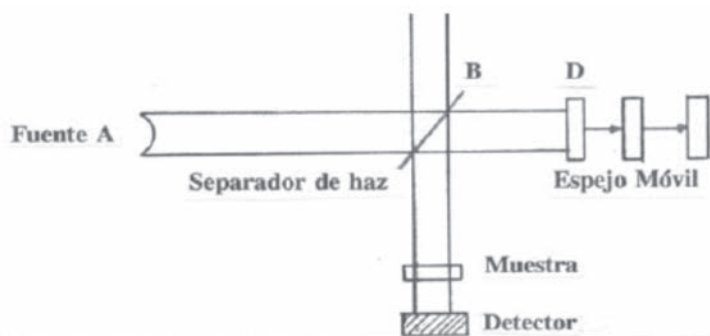


Figura 12. Esquema de un interferómetro^[12].

El esquema de un interferómetro se muestra en la figura 12, consta de un divisor de haz B que refleja la radiación infrarroja hacia un espejo fijo C y hacia otro móvil D. Los dos haces reflejados se recombinan de nuevo en el divisor de haz, interfiriendo constructiva o destructivamente según sea el valor de la diferencia de camino óptico entre el divisor y cada uno de los espejos. Por ejemplo, para un desfase $\delta=0, \lambda, 2\lambda, \dots$ los dos rayos interfieren constructivamente y si $\delta=\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$ destructivamente; así, si se va cambiando el valor del desfase suavemente desde cero; se detecta una señal de intensidad modulada como una función cosenoidal.

La señal de salida del interferómetro se denomina interferograma que es la suma de todas las ondas cosenoidales moduladas.

En espectroscopia infrarroja no existen buenos disolventes que sean transparentes a todas las radiaciones espectrales, lo que entraña una dificultad para determinar con exactitud la absorción de radiación por parte de las moléculas.

Se pueden analizar compuestos en estado sólido, líquido y gaseoso; el recipiente de la muestra será distinto según se presente la misma y ha de estar construido de un material transparente a la radiación, con las indicaciones que se hicieron al hablar de la construcción de los prismas, como redes de dispersión.

La espectroscopia infrarroja tiene aplicaciones en análisis cualitativo y cuantitativo. Su principal utilización ha sido en la identificación de compuestos orgánicos, debido a que no existen, teóricamente, dos compuestos que absorban exactamente en las mismas frecuencias.

También se emplea cada vez más en el análisis cuantitativo por su gran selectividad, lo que posibilita calcular concentraciones de una sustancia en una mezcla compleja sin la realización de separaciones previas. El proceso analítico cuantitativo es similar al de la espectroscopia visible y ultravioleta; sin embargo, las características del material y la sensibilidad del sistema de detección producen resultados más desfavorables. La espectroscopia de infrarrojo, como técnica cuantitativa, tiene su principal aplicación en el análisis de contaminantes atmosféricos provenientes de los procesos industriales.

Por lo que respecta al análisis cualitativo, la identificación de un compuesto se hace a partir del estudio sistemático del espectro correspondiente. Se empieza por identificar los grupos funcionales (enlaces químicos de la molécula); para ello, se utiliza un gráfico de correlación o tabla de grupos funcionales, donde aparecen las frecuencias en cm^{-1} a las que es previsible la aparición de las bandas de absorción de cada uno de los grupos funcionales, sin olvidar que los enlaces próximos pueden modificarlas ligeramente. En todos los casos, es importante tener en cuenta que si un espectro no contiene la absorción típica de cierto grupo funcional, la molécula no contiene dicho grupo.

Una vez localizados los grupos constituyentes de la molécula, con el resto de información que se disponga, se establece una hipótesis molecular y se pasa al análisis de la región de la huella dactilar (frecuencias $< 1.200 \text{ cm}^{-1}$) en las que se encuentran las bandas características de cada compuesto. En esta zona, pequeñas diferencias en la estructura y la constitución de las moléculas da lugar a variaciones importantes en los picos de absorción.

La mayoría de los enlaces simples se manifiestan con picos en esta zona, que al tener intensidades parecidas, se produce una fuerte interacción entre enlaces vecinos; lo que da como resultado bandas de combinación, que están en función de la estructura general de la molécula.

Compuestos que normalmente se analizan cualitativamente son: parafinas, aromáticos, olefinas, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, fenoles, ésteres, éteres, aminas, amidas, anhídridos, etc.

Tabla 2. Intervalo de frecuencias y tipos de vibraciones características de los grupos funcionales^[12].

INTERVALO DE FRECUENCIAS (v cm ⁻¹)	TIPO DE VIBRACION	ENLACE
3500 - 3200	Tensión	O-H, N-H
3300 - 3000	Tensión	=C-H, ≡C-H, Ar-H
3500 - 2500	Tensión	O-H + C-H (Acido)
3000 - 2800	Tensión	CH ₃ , -CH ₂ -, C-H ^δ , O=C ^δ H
2400 - 2100	Tensión	C=C, C≡N
2000 - 1650	Vibraciones Secundarias	Procedentes del Ar-H deformación (3-4 bandas)
1800 -1650	Tensión	C=O (ácidos, cetonas, aldehidos, amidas, ésteres)
1675 -1500	Tensión	C=C, C=N (alifáticos y aromáticos)
1650 - 1550	Deformación	N-H
1475 - 1300	Deformación	C-H
1300 - 1100	Tensión	C-O (éteres)
1300 - 1050	Tensión	C-O (ésteres) (2 bandas)
1000 - 600	Deformación	C=C-H, Ar-H (fuera del plano)

Técnica DIAL (LIDAR, Absorción diferencial por búsqueda y detección de luz)

LIDAR es un acrónimo para detección y rastreo de luz (Light Detection and Ranging), un sensor activo muy similar al Radar pero que mide la radiación devuelta ya sea por la superficie terrestre o por las partículas que componen la atmosfera cuando se ilumina por una fuente de luz láser. La longitud de onda utilizada en los sensores LIDAR permiten análisis detallados en la observación, sin embargo, el láser no puede penetrar capas espesas como las nubes.

Los sensores lidar se utilizan en forma efectiva para medir la altura de los objetos, tales como la altura relativa de la cubierta vegetal respecto de la superficie del suelo o la profundidad relativa de una capa de agua. El altímetro lidar proporciona información sobre la topografía de la superficie terrestre. No obstante destacan sus aplicaciones en estudios atmosféricos. El lidar multifrecuencia con longitudes de onda en el visible e infrarrojo se utiliza para medir la distribución en altura de los aerosoles y la altura de las nubes. El dispersómetro lidar y el de absorción diferencial pueden ser utilizados para medir las propiedades de las nubes, y el lidar doppler para estimar vientos en 3D en atmósferas claras.

La técnica DIAL (Lidar de Absorción Diferencial) es un ejemplo de una tecnología de teledetección activa, el cual se basa en que puede emitir su propia energía electromagnética a un blanco y luego registrar la interacción que ocurre entre la energía y el blanco. Un sistema DIAL envía pulsaciones controladas de energía láser y luego mide la interacción entre la energía láser y el blanco.

Las ventajas que posee esta técnica es la capacidad de obtener mediciones directas de gases específicos, sin importar la hora del día ni la estación del año. Capacidad de localizar y cuantificar con exactitud las emisiones. La capacidad de controlar la iluminación del blanco. Los sistemas activos tienen mejor ventaja cuando el sol no proporciona de manera suficiente las longitudes de onda deseadas, como por ejemplo partes de la mitad de la onda de los rayos infrarrojos (IR).

Sus desventajas son que requiere una gran cantidad de energía generada para iluminar adecuadamente al blanco. Entre otras desventajas

se encuentran los complejos diseños de sistema, los componentes, la integración y el análisis de los datos.

Existen otras técnicas que pueden ser empleadas en el estudio de contaminantes como la manipulación de micropartículas utilizando pinzas ópticas, el principio de atrapamiento de una micropartícula se basa en las dimensiones de esta, si su diámetro es menor que la longitud de onda del haz láser utilizado se trabaja en el régimen de campos ópticos o Rayleigh, en caso contrario se trabaja en el régimen de rayos ópticos de Mie.

La técnica de barrido en z para la caracterización óptica no lineal de materiales, utilizada para determinar el signo y la magnitud del coeficiente del índice de refracción no lineal de una muestra moviéndose a lo largo de un haz altamente enfocado.

Lo anterior define el seguimiento que habrá de darle al campo de la óptica en materia ambiental, específicamente en el estudio de la contaminación y en el análisis de los contaminantes.

Bibliografía

1. Conrad G. Mueller y Mae Rudolph. 1980. *Luz y visión*, Time life books, segunda edición.
2. Eugene Hecht. 1992. McGraw-Hill
3. <http://es.wikipedia.org/>
4. Eugene D. Olsen. 1990. *Métodos ópticos de análisis*, 535 páginas.
5. <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/index.htm>
6. Concepción Pérez Conde. 1996. *Sensores ópticos*, 180 páginas.
7. Harold F. Walton, Frederic Walton Harnold, Jorge Reyes, Enric Cassas, J. Duñach Archs. 1983. *Análisis químico e instrumental moderno*, 391 páginas.
8. Telle, Helmut H., Ángel González Ureña, Robert J. Donovan. 2007. *Laser Chemistry: Spectroscopy, Dynamics and Applications*, Ed. Wiley, 502
9. Noxon, J. F. 1978. *Stratospheric NO₂ in the antartic winter*, Geophys. Res. Lett., 5, 1021-1022.
10. Noxon, J. F. 1979. *Stratospheric NO₂, Global behavior*, Geophys. Res. Lett., 84, 5067-15076.

11. M. Hausmann, U. Platt. 1994. *Spectroscopic measurement of bromine oxide and ozone in the high arctic during polar sunrise experiment 1992*. J. Geophys. Res. 99, 25.399-25.413
12. Conley, R.T. 1979. *Espectroscopia infrarroja*, Ed. Alhambra, Madrid.
13. Rodríguez, A. 1998. *Sistemas lidar coherentes e incoherentes de baja potencia para la detección de velocidad de blancos sólidos*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Diciembre.
14. Markus W. Sigrist. 1994. *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*, 531 páginas.
15. Carolyn R. Mercer. 2003. *Optical Metrology for Fluids, Combustion and Solids*, 460 páginas.
16. Seoáñez Calvo Mariano, Irene Angulo Aguado. 1997. *Ingeniería medioambiental aplicada: Resolución de 120 casos prácticos*, 528 páginas.
17. Jens Besenberg, David J. Brassington, David Brassington, Paul C. Simon. 1997. *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring: Lidar, EUROTRAC*. 394 páginas.
18. Conley, R.T. 1979. *Espectroscopia infrarroja*, Ed. Alhambra, Madrid.
19. Creswell, C.J., Runquist, O.A. y Campbell, M.M. 1979. *Análisis espectral de compuestos orgánicos*, Ed. Diana, México.
20. Skoog, D.A. y West, D.M. 1989. *Análisis Instrumental*, Ed. Mc Graw Hill, México.

Rectoría

Ing. Roberto Domínguez Castellanos
RECTOR

Mtro. José Francisco Nigenda Pérez
SECRETARIO GENERAL

C.P. Miriam Matilde Solís Domínguez
AUDITORA GENERAL

Lic. Adrián Velázquez Megchún
ABOGADO GENERAL

Mtro. Pascual Ramos García
DIRECTOR DE PLANEACIÓN

Dr. Amín Andrés Miceli Ruiz
DIRECTOR ACADÉMICO

Mtro. Jaime Antonio Guillén Albores
DIRECTOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

CMF. Juan José Ortega Alejandre
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

C.P. Julio César Vázquez Pérez
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN

L.R.P. Aurora Evangelina Serrano Roblero
DIRECTORA DE SERVICIOS ESCOLARES

Ing. Luis Antonio Aceituno Gen
DIRECTOR DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN

Lic. Noé Fernando Gutiérrez González
DIRECTOR DE SERVICIOS DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

Dependencias de Educación Superior

C.D. Jaime Raúl Zebadúa Picone
DIRECTOR DE LA DES DE ODONTOLOGÍA

Mtra. Érika Judith López Zúñiga
DIRECTORA DE LA DES DE NUTRICIÓN

Mtro. Martín de Jesús Ovalle Sosa
DIRECTOR DE LA DES DE PSICOLOGÍA

Dra. Sandra Urania Moreno Andrade
DIRECTORA DE LA DES DE BIOLOGÍA

Ing. Francisco Félix Domínguez Salazar
Director de la Des de Ingenierías

Mtro. Carlos Gutiérrez Alfonso
DIRECTOR DE LA DES DEL CESMECA

Ing. Javier Balboa Garcíaprieto
DIRECTOR DE LA DES DE OFERTA REGIONALIZADA

Antrop. Julio Alberto Pimentel Tort
DIRECTOR DE LA DES DE ARTES

Lic. Diego Martín Gámez Espinosa
COORDINADOR DEL CENTRO DE LENGUAS


**Colección
Jaguar**



UNICACH

**Estudios Ambientales
y Riesgos Naturales
Aportaciones al sureste de México**

Se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2009, con un tiraje de 500 ejemplares, en los Talleres de Ediciones de la Noche, Madero núm. 687, 44100, Guadalajara, Jalisco. Teléfono: 33-3825-1301. El diseño tipográfico estuvo a cargo de Salvador López Hernández, la corrección de Karen Dianne Limón Padilla y el cuidado de la edición de la Oficina Editorial de la UNICACH, durante el rectorado del Ing. Roberto Domínguez Castellanos.



Estudios ambientales y riesgos naturales ofrece un espacio de entendimiento de asuntos ambientales e inspiración al desarrollo de nuestra sociedad. Está compuesto de siete capítulos sustentados en investigaciones bibliográficas que contraponen diferentes puntos de vista y presentan a la consideración de estudiantes, profesores, especialistas y estudiosos de las ciencias ambientales, temas que nos son interesantes, pero sobre todo actuales e imprescindibles, independientemente del área de conocimiento en la que estemos especializados.

En el contenido se alude a una mancuerna temática de gran actualidad: Medio Ambiente y Riesgos Naturales; se analiza el impacto social y económico de los desastres naturales, ofreciendo un panorama general entorno a la actividad sísmica, alternativas de manejo para disminuir la vulnerabilidad a las plagas forestales de los bosques, la potabilización del agua, tratados alternativos de aguas residuales, manejo de los residuos sólidos y no peligrosos, la fibra óptica y su utilidad en la lucha contra los problemas de contaminación ambiental, entre otros.

La relevancia de este texto, primera aportación de la Coordinación de Ingeniería Ambiental de la Unicach, deriva de la amplia gama de ciencias que han convergido en él con la intención de concientizar la importancia de la interdisciplinariedad en el desarrollo del medio ambiente del cual formamos parte.

