

FOTOTERAPIA

F. Sendra Portero

La fototerapia, en sentido estricto, debe entenderse como el empleo terapéutico de la luz. Este agente físico, que acompaña al hombre desde que se inició su presencia en la tierra, es el responsable de la vida tal como la conocemos actualmente. El sol constituye una fuente de energía térmica, que determina la habitabilidad del planeta, aporta condiciones cíclicas de luminosidad a las que se han adaptado numerosas plantas y animales, y proporciona radiaciones imprescindibles para desencadenar importantes reacciones químicas.

Se tiene constancia de que, desde épocas remotas, el hombre ha aprendido a utilizar los recursos terapéuticos de las radiaciones solares. Éstas tienen tres componentes, desde un punto de vista físico: uno térmico, constituido por la radiación infrarroja; uno visible, responsable de la luminosidad, y otro ultravioleta, más energético, responsable de reacciones denominadas fotoquímicas, como la síntesis de vitamina D o la oxidación de la melanina.

En un sentido amplio, la fototerapia incluye el tratamiento con luz visible, radiación infrarroja y ultravioleta, tanto en su forma natural de producción, considerando el sol como agente terapéutico (helioterapia) como en aquellas formas artificiales de producción de radiaciones infrarrojas o ultravioletas. Asimismo, se integran en la fototerapia formas especiales de emisión, como la radiación láser. Por la importancia que tienen estos temas en medicina física, se analizarán con más detalle en capítulos siguientes, mientras que en el presente capítulo se prestará atención a fundamentos físicos y aspectos biomédicos de índole general.

CONCEPTO Y NATURALEZA DE LA LUZ

La naturaleza de la luz ha sido objeto de numerosas discusiones científicas. En la historia de la ciencia se encuentran diversas teorías para explicarla, conocidas como «teorías de la luz»,

Hasta finales del siglo XVIII, predominó la teoría corpuscular de la luz, cuyo principal defensor fue Newton. Según dicha teoría, la luz está constituida por numerosas partículas o corpúsculos, que, emitidos por los cuerpos incandescentes, se propagan linealmente a través de los medios transparentes, estimulando la visión al penetrar en el ojo. A lo largo del siglo pasado, cuando el hombre intenta encontrar explicación racional a fenómenos eléctricos y luminosos, surge la teoría ondulatoria de la luz, a la par que comienzan a estudiarse las radiaciones electromagnéticas.

En el año 1870, J. C. Maxwell, profesor del King's College de Londres, desarrolló las ecuaciones que rigen la propagación de las ondas electromagnéticas y enunció que ésta se realiza en forma de movimiento ondulatorio. En su planteamiento, al calcular la velocidad de propagación de estas ondas, señaló que la luz debería ser una forma de energía electromagnética. La velocidad de propagación de estas ondas en el vacío es una de las constantes físicas fundamentales de la naturaleza y se designa mediante el símbolo c , cuyo valor aproximado es 3×10^8 m/s.

Años después de la muerte de Maxwell, concretamente entre 1887 y 1891, Hertz demostró que la energía electromagnética en forma de ondas de radio se propaga por el espacio, efectivamente, mediante un movimiento ondulatorio. Pronto se demostraría que la luz no sólo viaja a la velocidad predicha en las ecuaciones de Maxwell, sino que además se comporta de acuerdo con ellas en muchos otros aspectos. Se aceptó en consecuencia, que estas ondas luminosas eran radiaciones electromagnéticas.

Justo en el inicio del siglo XX, Planck descubrió que la energía de un oscilador era igual a la frecuencia de la radiación en ciclos por segundo o hercios, multiplicada por una constante h , conocida como constante de Planck., cuyo valor es de 6.6256×10^{-34} julios/s. A partir de este descubrimiento, desarrolló la teoría cuántica, la cual enuncia que la energía se propaga mediante «cuantos» o «paquetes energéticos» y no por ondas continuas.

En esa misma época, comenzaron a estudiarse ciertos fenómenos provocados por radiaciones luminosas, que no podían explicarse por la teoría electromagnética desarrollada por Maxwell. Uno de estos fenómenos era el efecto fotoeléctrico, consistente en la emisión de electrones por las superficies de ciertos metales al ser iluminadas por un rayo de luz. Se observaba que, si aumentaba la frecuencia de la luz incidente, se producía un aumento en la energía cinética de los electrones desprendidos. Albert Einstein encontró que podía igualarse la energía cinética de un rayo de luz (producto de su frecuencia por la constante de Planck) incidente sobre una lámina de cinc a la suma de la energía cinética del electrón liberado, más otra cantidad característica de cada sustancia fotosensible, a la que este autor denominó «función trabajo» o «trabajo de extracción». En 1905, Einstein publicó su teoría fotónica, en la que aplicaba la teoría cuántica en el campo de la electricidad y la luz.

Tanto Planck como Einstein admitieron que la luz está constituida por pequeñísimos paquetes de ondas, denominados fotones, que son emitidos por los cuerpos luminosos, se propagan en todas las direcciones del espacio y transportan una cantidad de energía determinada, proporcional a la frecuencia de su onda, dada por la fórmula:

$$E = h \times v$$

donde h es la constante de Planck y v la frecuencia. De esta forma, la teoría fotónica, hija directa de la teoría cuántica de Planck, acabó enlazando las teorías corpuscular y ondulatoria, antaño contrapuestas.

RADIACIÓN ELECTROMAGNETICA: ESPECTRO LUMINOSO

Muchos fenómenos físicos sin correlación aparente, como la radiación gamma, radiación X, luz visible, ondas de radio, etc., son radiaciones electromagnéticas, cuya diferencia reside en sus correspondientes longitudes de onda.

Las ondas electromagnéticas están formadas por la propagación de una vibración, la de los campos eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí y a la dirección de avance (fig. 18.1). La intensidad de la onda es igual a la energía E que transporta por unidad de tiempo t , a través de una superficie S , perpendicular a su dirección de avance, según la expresión:

$$I = E/S \times t$$

siendo su unidad el julio/m² x s, o teniendo en cuenta que la energía es igual al cociente potencia/tiempo, Wat/m². La propagación de las ondas electromagnéticas puede sufrir los fenómenos de reflexión, refracción, difusión, interferencia, difracción y polarización.

La fracción de la vibración, en la dirección de propagación de una onda, entre dos puntos en concordancia de fase, se denomina oscilación completa o ciclo (fig. 18.2). La longitud de onda es la distancia mínima que existe, en la dirección de propagación de una onda, entre dos puntos en concordancia de fase; también puede definirse como la distancia recorrida por una onda en un periodo. Se expresa en unidades de longitud.

Amplitud es la altura máxima de la semionda en relación a la posición de reposo. Se denomina periodo al tiempo en segundos que tarda en producirse una oscilación completa y frecuencia es el número de ciclos u oscilaciones completas que tienen lugar en la unidad de tiempo. Su unidad es el hercio, que equivale a un ciclo/segundo. Ambas magnitudes, periodo y frecuencia, son inversas. La ecuación fundamental del movimiento ondulatorio es:

$$\lambda = c \times T = c/v$$

donde λ es la longitud de onda, c la velocidad de propagación, T el período y v la frecuencia. Cuando se quiere identificar una radiación electromagnética, puede utilizarse su longitud de onda o su frecuencia, aunque convencionalmente se emplea la primera con mayor asiduidad.

El conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas conocidas constituye un espectro continuo de extraordinaria amplitud, que se extiende desde las ondas radioeléctricas más largas hasta los rayos gamma más energéticos. En el espectro electromagnético, cuyo esquema se muestra en la figura 18.3, las diferentes radiaciones se disponen en orden decreciente de longitud de onda (lo que equivale a un orden creciente de frecuencia). Como puede observarse en la citada figura, la luz visible por el ojo humano constituye una porción muy reducida del espectro.

Conviene resaltar que los límites entre radiaciones no son precisos. Se trata de transiciones continuas, que, en el caso de la luz, dependen en gran parte de la capacidad visual de cada individuo. De hecho, los límites de la radiación visible con el infrarrojo y el ultravioleta vienen determinados por la capacidad de impresionar la retina.

PROPIEDADES GENERALES DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

Para las aplicaciones médicas de las radiaciones empleadas en fototerapia, hay que tener en cuenta una serie de leyes y propiedades, como son:

1. Ley del inverso del cuadrado de la distancia. Establece que la intensidad de una radiación electromagnética que incide sobre una superficie determinada está en relación inversa con el cuadrado de la distancia entre el foco emisor y la superficie. En consecuencia, si a una distancia unidad la intensidad es uno, a distancias sucesivamente mayores, 2,3,4,5, etc., la intensidad será 1/4, 1/9, 1/16, 1/25 y así sucesivamente (fig. 18.4).

De esta forma, es fácil calcular la intensidad a una distancia determinada. Si conocemos la intensidad I_a a una distancia d_a del foco emisor, la intensidad I_b a una nueva distancia d_b vendrá dada por la expresión:

$$I_b = (I_a \times d_a^2) / d_b^2$$

2. Ley del coseno de Lambert. Establece que la máxima intensidad de la irradiación sobre una superficie se obtiene cuando el haz incide perpendicularmente sobre ésta. Si la incidencia no es perpendicular, la intensidad disminuye, según la expresión:

$$I = I_0 \times \cos \alpha$$

Donde I_0 es la intensidad perpendicular a la superficie y α el ángulo entre cualquier punto considerado y la perpendicular (fig. 18.5). Por ello, es necesario realizar las aplicaciones lo más perpendicularmente posible sobre la superficie que se irradia. Se acepta que desviaciones inferiores a 30° (cuyo coseno es 0,866) no producen disminuciones importantes de la intensidad de la radiación.

3. Ley de Bunsen-Roscoe. Establece que el producto de la intensidad de la radiación por el tiempo de aplicación, elevado a una potencia n (exponente de Schwazchild), es constante. Para efectos fotobiológicos se considera n igual a 1, por lo que, para conseguir los mismos efectos, pueden manejarse el tiempo y la intensidad, de forma que si la intensidad es el doble, el tiempo debe reducirse a la mitad, y viceversa.

4. Ley de Grotthus-Draper. Indica que, desde el punto de vista de los efectos biológicos, sólo es eficaz la radiación absorbida. Por ello, hay que tener en cuenta que, en la aplicación de radiaciones, hay una cantidad que se refleja en la piel o se dispersa hacia otros tejidos y que no tiene efecto sobre los tejidos considerados.

EMISIÓN DE LUZ

Después de abordar las características de propagación de las ondas electromagnéticas, es conveniente reseñar algunos aspectos sobre su emisión, especialmente los de carácter atómico. Pero, antes, conviene repasar algo de historia respecto a la estructura atómica.

Modelos atómicos

Durante el siglo XIX, cierto número de observaciones indicaban que el átomo no era una partícula fundamental indivisible, como se creía desde la Grecia clásica, sino que poseía estructura interna. Entre estas observaciones se encuentran: los experimentos de Faraday sobre electrólisis, el descubrimiento del electrón por Crookes y Thomson, el descubrimiento de los rayos X por Roentgen y el hallazgo de la radiactividad por Becquerel. Inicialmente se consideró un modelo atómico según el cual el átomo era una masa esférica de carga positiva, en cuyo seno se encontraban electrones repartidos de alguna manera desconocida. En este modelo, debido a Thomson, se suponía que la mezcla de electrones era razonablemente uniforme y por tanto, todas las porciones del átomo eran eléctricamente neutras.

Esta imagen del átomo fue puesta en duda por Lenard en 1903, quien, al hacer pasar un haz de electrones por una delgada lámina de metal, observó que la mayor parte de los electrones la atravesaban sin ser desviados, Concluyó que el modelo atómico de Thomson era incorrecto y propuso la hipótesis de que el átomo consiste en agregados muy pequeños de carga positiva y negativa, y que su volumen está vacío en su mayor parte.

Los experimentos de Lenard impulsaron a E. Rutherford y a sus colaboradores a emplear medidas más precisas, utilizando como haz incidente partículas alfa emitidas por una fuente radiactiva, en lugar de electrones. En 1911, Rutherford propuso un nuevo modelo atómico, constituido por un núcleo, en el que estarían los protones o cargas positivas, en el cual residiría prácticamente toda la masa del átomo, y —a distancia de éste— una corona o corteza de electrones o cargas negativas, girando a gran velocidad para compensar la atracción eléctrica del núcleo.

Una contradicción se alzaba frente al modelo atómico de Rutherford: cuando un cuerpo gira, se somete a una aceleración perpendicular a su trayectoria y dirigida hacia el centro del giro. Por otro lado, se sabía que toda carga eléctrica sometida a una aceleración emite energía en forma de ondas electromagnéticas. Si los electrones de la corteza perdían energía cinética, terminarían precipitándose en el núcleo, por lo que el átomo, sería inestable, hecho que no ocurre en la realidad.

Niels Bohr, en 1913, mejoró este modelo proporcionando una idea que satisfacía casi todas las exigencias. Según el físico danés, los electrones sólo pueden girar en torno al núcleo en ciertas órbitas fijas, en las que ni absorben ni emiten energía, es decir, no emiten radiación. El salto a una órbita más externa requiere un aporte de energía. Por el contrario al retornar el electrón a su órbita primitiva, se produce la emisión de la diferencia energética por el fenómeno de «emisión espontánea de radiación». Bohr llegó a calcular, en sus investigaciones, los radios de las diversas órbitas estables posibles para el electrón del hidrógeno. Su modelo atómico explica claramente el esquema y comportamiento de los átomos de bajo peso atómico. Sin embargo, no ofrece ninguna explicación satisfactoria para la estructura y comportamiento de átomos plurielectrónicos más complejos.

Fue Schrödinger quien desarrolló la ecuación para un electrón de átomo complejo, que se mueve sometido a la atracción nuclear y a la repulsión mutua de los restantes electrones, y obtuvo una solución aproximativa de significado análogo para el caso de un electrón. Del compendio de sus estudios y de los de otros físicos, como Heisenberg, surgió la ciencia que hoy se denomina mecánica cuántica; ésta explica de forma real los fenómenos que se desarrollan en el interior del átomo y permite a los físicos estudiar las últimas transformaciones de la materia. El esquema atómico de Bohr, modificado por ambos físicos, tiene plena validez como explicación suficiente de los fenómenos que se estudiarán a continuación.

Emisión espontánea de radiación

En la teoría sobre la estructura atómica propuesta por Bohr en 1913, se explican satisfactoriamente las características observadas en el espectro de radiación electromagnética emitida por ciertos átomos de estructura simple. Dicha teoría describe a los electrones circulando en torno al núcleo en órbitas permitidas, en las cuales ni ceden ni absorben energía. Las órbitas

circulares permitidas están determinadas por el hecho de que el momento angular del electrón sea un múltiplo entero de $h/2\pi$ (constante de Planck/ 2π).

El átomo tiende, de acuerdo con la regla general de la naturaleza a permanecer en estado fundamental de mínima energía y constituye un sistema estable. Cuando existe un aporte externo de energía, alguno de sus electrones puede absorberla y alcanzar otra órbita superior, con lo que el átomo adquiere un nivel de energía superior. Esto es lo que se conoce como estado de excitación. El proceso de desexcitación se realiza en un tiempo del orden de 10^{-5} a 10^{-9} segundos. Todo este fenómeno se conoce como emisión espontánea de radiación.(fig. 18.6). Si los saltos entre niveles se realizan por absorción o emisión de energía electromagnética, la energía incidente o resultante será igual a la diferencia entre el nivel inicial y el final. Ésta es la condición de frecuencias de Bohr

$$h \times \nu_{if} = E_i - E_f$$

según la cual, la frecuencia de la radiación incidente o resultante tiene un valor determinado por la diferencia de niveles energéticos inicial y final E_i y E_f .

En la absorción, los átomos realizan una transición desde un nivel de energía inferior a otro superior, a costa de la energía aportada al sistema, que deberá ser superior a $E_f - E_i$, mientras que en la emisión la pérdida de energía por el sistema atómico aparece en forma de fotones.

Sistemas de producción de luz

La forma en que se originan las radiaciones electromagnéticas puede describirse en términos de transiciones nucleares, atómicas o moleculares. Los fotones que se originan por transiciones de niveles de energía en el interior del núcleo son altamente energéticos y característicos de cada tipo de núcleo atómico (radiación gamma, p. ej.). En cambio, las transiciones atómicas, en los electrones corticales, tienen como resultado fotones de energía moderada entre los rayos X blandos, ultravioleta y porciones visibles del espectro. En las moléculas, los electrones gravitan en órbitas comunes a grupos de varios átomos; estas órbitas también están cuantificadas y las energías de enlace de sus electrones son características de las moléculas y grupos químicos formados. Modificaciones ligeras en los estados de energía de los enlaces moleculares pueden originar fotones infrarrojos o microondas.

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, para hacer posible la emisión de radiación se requieren estados previamente excitados. Excitar un átomo consiste en provocar un desplazamiento de sus electrones a órbitas o niveles de mayor energía, suministrándole la necesaria para realizar el salto, ya sea en forma de energía térmica, cinética o electromagnética.

Al elevar la temperatura de un cuerpo, se suceden una variedad de transiciones que tienen como consecuencia la emisión de fotones de frecuencia diversa. Si el incremento térmico es considerablemente grande, dicho cuerpo se calienta hasta la incandescencia, estado en el que se emiten fotones de muy amplia variedad, parte de los cuales pertenecen a la franja visible del espectro electromagnético. Éste es el fundamento de las fuentes luminosas incandescentes, como el fuego o las lámparas de filamento.

La energía necesaria para la excitación puede obtenerse, también, haciendo pasar un haz de electrones a través de un gas. Los electrones orbitales de los átomos de gas pueden absorber la energía cinética de los electrones incidentes que colisionan con ellos (colisión inelástica) o pueden no hacerlo (colisión elástica): ello depende de que la energía cinética del electrón incidente sea mayor o menor que la energía de excitación. Del tipo de gas dependerá la emisión característica o más abundante. Así, por ejemplo, determinadas mezclas de gases producen luz de un color determinado, o el mercurio vaporizado proporciona gran cantidad de radiación ultravioleta.

Otra posibilidad de conseguir la excitación atómica consiste en aprovechar la acción de un haz de radiación electromagnética cuyos fotones tengan la energía suficiente para provocar algunos de los saltos posibles en los átomos absorbentes. Cuando todos los fotones del haz incidente son de la misma energía —es decir, cuando se trata de un haz monocromático— y dicha energía es, precisamente, la necesaria y suficiente para provocar alguno de esos saltos, la absorción es particularmente intensa, mucho más que cuando la energía de la radiación incidente es mayor o menor. Se dice, entonces, que los fotones incidentes entran en resonancia con los átomos, a los que excitan y por los que son absorbidos. Este fenómeno tiene especial importancia en la producción de radiación láser.

Habitualmente, para el conjunto de átomos que configuran el material productor de radiación (p. ej., el filamento de una lámpara), la excitación y posterior desexcitación no es homogénea, por lo que se produce una emisión de radiaciones de muy diversas energías, lo que significa que son de diferentes longitudes de onda; ella se denomina emisión heterocromática, al contener diversos colores del espectro visible. La emisión de radiación a partir del foco es multidireccional, esto es, se realiza en todas las direcciones del espacio. Los sistemas láser son los únicos capaces de producir radiación monocromática y unidireccional, IR, visible o UV, según el material que constituya su medio activo, en el que se producen las transiciones energéticas necesarias para la emisión de radiación.

Algunos de los sistemas de producción artificial de luz son:

- a) Lámparas de filamento incandescente.
- b) Lámparas de descarga eléctrica en gases o vapores metálicos.
- c) Lámparas fluorescentes.
- d) Lámparas de arco.
- e) Sistemas electroluminescentes y diodos emisores de luz (LED).
- f) Sistemas láser.

Fluorescencia y fosforescencia

Existen sustancias cuyos átomos requieren elevada energía para que sus electrones alcancen el nivel de excitación. La desexcitación subsiguiente debería producir una radiación de energía considerable, posiblemente fuera del espectro visible; sin embargo, en dichas sustancias, la

desexcitación se produce en varios saltos y se emiten varios fotones de menor energía, dentro del espectro luminoso. Este fenómeno es conocido como fluorescencia. Basándose en él, los llamados tubos fluorescentes utilizados para la iluminación aprovechan el elevado rendimiento luminoso que se obtiene en el proceso.

Hasta ahora se ha supuesto que la desexcitación de un átomo se produce inmediatamente después de la excitación, 10^{-9} segundos a lo sumo. Ciertamente, es lo más frecuente; sin embargo, existen átomos que pueden permanecer en estado excitado durante un tiempo considerable: incluso varias horas, en algunos casos. Se dice, entonces, que estos átomos se encuentran en estado metaestable y el fenómeno en sí se denomina fosforescencia.

Emisión solar

El sol constituye la principal fuente natural de producción de luz y otras radiaciones de interés en fototerapia. La gran cantidad de elementos y transiciones energéticas que se producen en él hacen que su radiación sea muy variada. La radiación solar que llega a la superficie terrestre está compuesta en el 59% de radiación infrarroja (IR), en el 40% de luz visible y en el 1% de radiación ultravioleta (UV). Ello le confiere efectos diversos, fototérmicos, fotoluminosos y fotoquímicos. Hoy día pueden conseguirse, por medios artificiales, prácticamente todos los componentes del espectro de radiación solar.

La radiación infrarroja (IR) incluye radiaciones cuyas longitudes de onda están comprendidas entre los 760 y los 15.000 nm. A efectos prácticos, los IR suelen dividirse en IR proximales (760-1.500 nm) e IR distales (1.500-15.000 nm).

La radiación UV ocupa la parte del espectro electromagnético existente entre la luz visible y los rayos X de menor energía. El límite con la luz visible se sitúa en torno a los 400 nm, que es el límite de percepción visual del color violeta. Puesto que el límite es fisiológico, algunos autores lo sitúan entre los 400 y los 390 nm. El sol es la principal fuente natural de esta radiación; emite en una amplia gama de frecuencias UV. Los efectos biológicos son muy variables y están en función de la longitud de onda; por esta razón, el espectro ultravioleta se subdivide en tres regiones:

UV-A: 400-320 nm

UV-B: 320-290 nm

UV-C: 290-200 nm

La luz visible constituye la gama del espectro perceptible por la retina humana. En condiciones normales, comprende longitudes de onda desde 780 hasta 400 nm, situados entre la radiación IR y UV. La luz «blanca» es, en realidad, una mezcla de diferentes colores (los del espectro visible), cada uno de ellos con diferentes longitudes de onda. Normalmente, se habla de los siete colores espectrales: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta. Éstos son distinguibles con cierta facilidad en la descomposición de la luz blanca, tanto de forma artificial, utilizando un prisma, como natural, cuyo ejemplo más conocido es el arco iris.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LA LUZ. INTERACCIÓN CON LOS TEJIDOS

Desde un punto de vista macroscópico, la interacción de las radiaciones empleadas en fototerapia con la materia se realiza básicamente en dos niveles: a) en las interfases, mediante los fenómenos de reflexión y refracción, y b) en el interior del medio, donde tiene lugar la transmisión, hecho que depende de los fenómenos de absorción o dispersión. En muchos casos, uno de estos fenómenos predomina hasta excluir, prácticamente a los otros. Sin embargo, todos los fenómenos están siempre presentes en mayor o menor grado.

La fracción de un haz luminoso que, al incidir sobre un tejido, va a conseguir un efecto determinado será exclusivamente aquella que realice el fenómeno de absorción. Esto viene establecido por la ley de Grotthus-Draper, de cuyo significado se desprende que los efectos biológicos de una radiación no son resultado de la energía del haz incidente, sino de la energía que dicho haz cede al medio.

En el esquema de la figura 18.7 se recogen diversas posibilidades de interacción de los fotones de una fuente luminosa de intensidad I_0 , al atravesar un material, supongamos un tejido biológico, de espesor determinado. Parte de los fotones pueden ser reflejados desde la superficie iluminada o pueden sufrir dispersión en el interior del medio, hacia el exterior de la superficie. En ambos casos, la luz es remitida desde la cara tisular iluminada y supone la pérdida de una fracción significativa de I_0 . Otra posibilidad es que parte de los fotones del haz incidente sean dispersados en el interior del tejido, con lo que terminan por emerger por la cara opuesta a la iluminada o, alternativamente, terminan por absorberse en el tejido, cediendo su energía. Un fotón del haz incidente puede reflejarse en alguna superficie o interfase, para después sufrir alguno de los fenómenos citados anteriormente. Por último, un fotón puede ser transportado sin desviarse a través del tejido y emerger con su curso original, aunque este hecho tiene una baja probabilidad de ocurrir, menor cuanto mayor es el espesor del tejido en cuestión.

Interacción en las interfases. Reflexión y refracción

Como se ha mencionado anteriormente, los fenómenos de reflexión y refracción tienen lugar en las interfases de los medios por donde se transmite la luz.

Desde un punto de vista físico, pueden considerarse dos tipos de reflexión de interés: la reflexión especular y la reflexión difusa. En la reflexión especular, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia y la luz reflejada tiene una trayectoria muy definida y concreta. Esta forma de reflexión se da en superficies muy lisas o pulidas, concretamente cuando el tamaño de las irregularidades de la superficie es menor que la longitud de onda de la radiación que incide sobre ella. Por el contrario, cuando las irregularidades de la superficie están orientadas al azar o son considerablemente mayores que la longitud de onda, tiene lugar la reflexión difusa, en la que la luz es dirigida aleatoriamente en múltiples direcciones.

La reflexión especular y la difusa son altamente dependientes de la longitud de onda de la radiación. Una misma superficie puede originar reflexión especular para una longitud de onda determinada y difusa para otra menor; aunque es preciso señalar que, para la región visible del espectro electromagnético, la mayoría de las superficies naturales producen reflexión difusa.

La refracción tiene lugar siempre que un haz de luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción n . La consecuencia inmediata es la desviación de la trayectoria de dicho haz al atravesar la interfase entre ambos medios. Este fenómeno se observa con frecuencia en las interfases aire-agua y aire-cristal. La ley de la refracción, también conocida como ley de Snell, establece que el ángulo de incidencia θ_1 y el de refracción θ_2 se relacionan mediante la ecuación:

$$\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = n_2 / n_1$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primer y segundo medio respectivamente.

Interacción con el medio. Transmisión

Cuando un haz de luz incide sobre un medio de espesor determinado, la luz transmitida que emerge de él dependerá de los fenómenos de absorción y dispersión, así como de la reflexión en las interfases del medio.

La transmisión es la proporción de flujo radiante que atraviesa el medio:

$$T = I / I_0$$

siendo I_0 la intensidad incidente e I la intensidad emergente del medio. A lo largo del espectro óptico, la transmisión varía marcadamente para cada longitud de onda. Además, las características de transmisión del medio se modifican enormemente con la naturaleza de éste.

La radiación transmitida está en función inversa de la atenuación realizada por el medio. Puede considerarse que la atenuación tiene dos componentes: la dispersión que «entreteiene» los fotones en el seno del medio y la absorción que produce la extinción real de dichos fotones. Tanto la dispersión como la absorción dependen de la longitud de onda de la radiación y de las características del medio considerado (tipo de partículas que lo componen, distribución, pigmentación, etc.)

Comportamiento óptico de los tejidos biológicos

Considerándolos como material óptico, los tejidos biológicos son una entidad turbia, que, al contrario de los materiales ópticos clásicos, no poseen superficies planas, estructuras cristalinas o un índice de refracción simple.

Ultramicroscópicamente, los tejidos están compuestos por una enorme variedad de moléculas, habitualmente de tamaño menor que la longitud de onda de la luz visible, la cual no tiene patrones geométricos rígidos y repetitivos de un punto a otro de su ambiente. Por encima de esta escala se encuentran las unidades celulares, con escasos patrones de regularidad en su distribución. Estas unidades celulares sí pueden ser de un tamaño próximo a las longitudes de onda de la luz.

A un nivel algo mayor, los diferentes tejidos, de distintas características ópticas, pueden disponerse en las regiones de una hipotética matriz, distribuyéndose habitualmente de forma aleatoria. Una escala macroscópica de estos tejidos muestra una combinación de superficies irregulares, capas no planas, estructuras conectivas, etc., que pueden tener diversas características de interacción con la luz.

Cuando se irradian estructuras inhomogéneas, como son los tejidos, se producen conjuntamente absorción y dispersión en el seno de éstos. Si bien la forma de realización de ambas depende de datos físicos, como la longitud de onda de la radiación o el tamaño de las partículas tisulares, en la absorción tiene importancia un factor adicional: la presencia de determinados pigmentos, elementos cromóforos, como la melanina, hemoglobina, mioglobina, etc. Éstos van a marcar claramente las diferencias de absorción de un tejido a otro. El grado de penetración de una longitud de onda determinada dependerá de la absorción de estos pigmentos y de la absorción competitiva de otros elementos celulares.

Algunos de los fotones incidentes sobre el tejido son retrodispersados y llegan a emerger por la cara incidente. De hecho, la mayor parte de la luz reflejada por la mayoría de los tejidos está causada por esta retrodispersión. La luz reflejada por un tejido homogéneo, como la córnea, es sólo del 3-5%, mientras que la luz reflejada por un tejido altamente dispersante, del tipo de la esclera, es del 50%.

El recorrido en «zig-zag» que describen los fotones, resultante de la dispersión múltiple en el seno del tejido, aumenta la posibilidad de encontrar moléculas absorbentes en su trayectoria, por tanto, aunque no hay pérdida de energía en el proceso de dispersión en sí mismo, éste contribuye a incrementar la absorción de los fotones. A partir de una determinada profundidad puede decirse que todos los fotones han sido sometidos a dispersión múltiple y podrán alcanzar cualquier punto desde todas las direcciones posibles. Así pues, la dispersión de la luz en los tejidos tiene tres importantes repercusiones: aumento de la reflexión, incremento de la absorción y distribución de la luz más isotrópica en la región distal a la superficie.

Adicionalmente, la interacción in vivo aún se hace más compleja, ya que la transparencia (o la atenuación) que muestran los tejidos biológicos a la luz varía con la actividad metabólica de éstos. Este hecho, ampliamente constatado, ha permitido la evaluación del estado de oxidorreducción de algunas moléculas (p. ej., la saturación de hemoglobina) de acuerdo con el espectro de absorción de los tejidos. Actualmente, este fenómeno se utiliza para monitorizar a los pacientes en el acto quirúrgico mediante la transiluminación del pulpejo de un dedo.

EFFECTOS GENERALES DE LA LUZ

Como se ha señalado anteriormente la fototerapia integra el estudio de las radiaciones electromagnéticas comprendidas en la zona del infrarrojo, la luz visible y el ultravioleta. La radiación del infrarrojo, rojo y cercana al rojo posee propiedades térmicas; la ultravioleta, violeta y cercana al violeta posee propiedades fotoquímicas, y la radiación visible es responsable de la luminosidad (fig. 18.8).

El efecto fototérmico se basa en el incremento de la energía vibracional de las moléculas al absorber la radiación, especialmente IR, con lo que se produce el calentamiento de los cuerpos.

El efecto fotoquímico se observa en numerosas reacciones químicas, que pueden ser aceleradas o provocadas por la luz, como la fotosíntesis de las plantas y la síntesis de vitamina D. Entre los efectos luminosos se incluyen fenómenos como la fotoluminiscencia, el efecto fotográfico y el mecanismo de la visión.

Tanto la radiación IR como la UV se tratarán mejor en los capítulos correspondientes por lo que en éste se prestará más atención a la franja visible del espectro, en la que pueden considerarse tres bandas:

- Rojo-anaranjado, con efecto térmico predominante.
- Amarillo-verde, en la que predomina el efecto luminoso. Es la menos fototérmica y presenta escasa actividad fotoquímica.
- Azul-violeta, de efectos casi exclusivamente fotoquímicos.

La luz, en términos generales, actúa regulando el complejo mecanismo, no muy bien conocido, de los ritmos circadianos del organismo. La dependencia de la luminosidad solar es tal que muchas de nuestras funciones vitales tienen un ritmo diferente, según sea de noche o de día. Por otra parte, influye en la regulación del sueño, debido al parecer, a la inhibición de melatonina, sustancia endógena muy estudiada actualmente en relación con la inducción del sueño. La luz estimula la secreción de melatonina y la oscuridad la inhibe. En cualquier caso, se necesitan horas de luz y horas de oscuridad en el día, pues parece que lo fisiológico es trabajar en un ambiente de luz y dormir en un ambiente de oscuridad. Las alteraciones de estas situaciones provocan conocidos desarreglos.

La luz puede influir, incluso, en nuestro estado de ánimo. Un ambiente luminoso invita a la actividad y la alegría, mientras que la oscuridad favorece la relajación y empuja a la tristeza, la melancolía o la angustia. Ello ha de tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el ambiente adecuado para la recuperación de una dolencia, según se busque relajación y sedación o estímulo y actividad en el paciente. La luminosidad forma parte indisoluble de la acción terapéutica del clima, la helioterapia o la talasoterapia, juntamente con los efectos de la radiación IR y UV.

Existe, como se ha indicado, una demostrada relación entre luminosidad y estado de ánimo. Los cambios de humor estacionales por ejemplo, llegan a manifestarse de manera patológica mediante depresiones pasajeras, conocidas como «depresión invernal», que suele cursar con aumento del apetito, pérdida de la capacidad de concentración e incremento de las horas de sueño. Estas depresiones son más importantes en los países nórdicos —donde las horas de luz y su intensidad son escasas en invierno— que en los países tropicales o del sur de Europa.

APLICACIONES MÉDICAS DE LA LUZ VISIBLE

La luz visible tiene diversas aplicaciones en medicina tanto terapéuticas como diagnósticas. Terapéuticamente, tiene especial importancia su empleo en la fototerapia de la hiperbilirrubinemia del recién nacido. Este tratamiento consiste en la exposición a la luz blanca intensa, especialmente en la gama en torno a los 460 nm (azul), que hace que en la piel y el tejido subcutáneo se produzcan isómeros de bilirrubina y lumirrubina; éstos son más hidrosolubles y se eliminan por el hígado y el riñón sin necesidad de conjugación. Para ello

existen lámparas especiales, que se adaptan a las incubadoras o a las cunas. El recién nacido se expone desnudo; es preciso proteger sus ojos con material opaco, para evitar una lesión retiniana.

En el ámbito diagnóstico, la luz visible ilumina las zonas que hay que inspeccionar o sirve de fuente luminosa para las endoscopías, en las que se recurre a fibras ópticas para visualizar órganos internos, como tubo digestivo, árbol bronquial, cavidades articulares, etc.

La diafanoscopia es una modalidad diagnóstica basada en el estudio de la transmisión de luz a través de masas de tejidos del organismo. La luz visible puede penetrar algunos centímetros de tejido, por lo que con este sistema se trata de apreciar si la transmisión a través de una determinada zona es normal o no.