

**LUZ Y VIDA.**  
**CONMEMORANDO EL DÍA**  
**INTERNACIONAL DE LA LUZ**

**CATÁLOGO DE LA EXPOSICIÓN**



**BENITO VALDÉS CASTRILLÓN**  
**ENRIQUE F. HITA VILLAVERDE**  
(COMISARIOS)

**INSTITUTO DE ACADEMIAS DE ANDALUCÍA**

**Patrocina:**

Fundación Cajasol.

**Colaboran:**

Universidad de Sevilla.

Universidad de Granada.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Centro Nacional de Aceleradores.

Comité Español del Día Internacional de la Luz.

Real Sociedad Española de Física (División de Enseñanza de la Física).

Lasing S.A.

MTB Tecnología de Precisión.

Fundación Descubre.

**Participan:**

Real Academia Sevillana de Ciencias.

Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.

Academia Malagueña de Ciencias.

Academia Iberoamericana de Farmacia.

Real Academia de Medicina y Cirugía de Sevilla.

Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental, Ceuta y Melilla.

Edita: Instituto de Academias de Andalucía

© De los textos: los autores

Impresión y maquetación: Imagraf impresores

Diseño del material gráfico: Rafael Gallardo Montiel

Depósito Legal: GR-790-2023

ISBN: 978-84-09-50956-0

## AUTORES

- Eduardo Battaner López.** Académico Numerario de la Academia de Ciencias Matemáticas Físico-Químicas y Naturales de Granada. Profesor Emérito de la Universidad de Granada. Miembro del Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional de la Universidad de Granada.
- Isabel Cárdenas Marcial.** Investigadora Asociada en el Laboratorio de Biología Marina de la Universidad de Sevilla. Área de Investigación del Acuario de Sevilla.
- Alberto J. Castro Tirado.** Académico Numerario de la Academia Malagueña de Ciencias. Académico Correspondiente de la Academia Iberoamericana de La Rábida. Profesor de Investigación del Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC.
- Irene Díaz Moreno.** Catedrática de Bioquímica de la Universidad de Sevilla. Miembro del Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad de Sevilla y del CSIC, Sevilla.
- Víctor Díaz del Río Español.** Académico Numerario de la Academia Malagueña de Ciencias. Investigador Científico (J) del Instituto Español de Oceanografía/CSIC (Centro Oceanográfico de Málaga).
- Rosario Fernández Fernández.** Académica Numeraria de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Catedrática de Química Orgánica en la Facultad de Química de la Universidad de Sevilla.
- F. Javier Fernández Mena.** Académico Numerario de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental, Ceuta y Melilla.
- José Carlos García Gómez.** Catedrático de Zoología de la Universidad de Sevilla. Miembro del Laboratorio de Biología Marina de la Universidad de Sevilla. Área de Investigación del Acuario de Sevilla.
- Antonio Gómez Expósito.** Académico Numerario de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Catedrático de Ingeniería Eléctrica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Director de la Cátedra Endesa Red.
- Enrique F. Hita Villaverde.** Académico Numerario de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada. Profesor Emérito de la Universidad de Granada.

**Luis M. Jiménez del Barco Jaldo.** Académico Numerario de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada. Catedrático de Óptica de la Universidad de Granada.

**Pedro D. Jordano Barbudo.** Académico Numerario de las Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España. Miembro de la *Academia Europaea*. Profesor de Investigación de la Estación Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla. Profesor Asociado en el Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla.

**José López Barneo.** Académico Numerario de las Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla. Miembro de la *Academia Europaea*. Catedrático de Fisiología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Sevilla. Miembro del Instituto de Biomedicina de Sevilla (IBIS), Hospital Universitario Virgen del Rocío/CSIC/Universidad de Sevilla.

**Yolanda Morilla García.** Titulada Superior de Apoyo Docencia e Investigación. Centro Nacional de Aceleradores de la Universidad de Sevilla, CSIC, Junta de Andalucía.

**Fernando Orellana Ramos.** Académico Numerario de la Academia Malagueña de Ciencias. Académico Correspondiente de las Reales Academias de Medicina y Cirugía de Sevilla y de Andalucía Oriental, Cuta y Melilla. Dr. Oftalmólogo

**Javier Romero Mora.** Académico correspondiente de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada. Catedrático de Óptica de la Universidad de Granada.

**Miguel Ángel de la Rosa Acosta.** Académico Numerario de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia. Miembro de la *Academia Europaea (MAE)* (Londres). Catedrático de Bioquímica en la Facultad de Biología de la Universidad de Sevilla. Miembro del Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad de Sevilla y del CSIC.

**Cristina Sánchez-Porro Álvarez.** Catedrática de Microbiología en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Sevilla.

**Benito Valdés Castrillón.** Académico Numerario de las Reales Academias Sevillana de Ciencias, de Medicina y Cirugía de Sevilla, y de la Academia Iberoamericana de Farmacia. Profesor Emérito de la Universidad de Sevilla.

**Antonio Ventosa Ucero.** Académico Correspondiente de la Academia Iberoamericana de Farmacia. Catedrático de Microbiología en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Sevilla.

## ÍNDICE

### **PRESENTACIÓN**

*Antonio Pulido Gutiérrez* ..... 11

### **PRÓLOGO**

*Benito Valdés Castrillón y Enrique F. Hita Villaverde*..... 15

### **INTRODUCCIÓN**

*M.<sup>a</sup> Josefa Yzuel Giménez* ..... 19

### **LA NATURALEZA DE LA LUZ. UN APASIONANTE HITO EN LA HISTORIA DE LA CIENCIA**

*Luis M. Jiménez del Barco Jaldo*..... 27

### **CONOCER EL UNIVERSO POR MEDIO DE LA LUZ**

*Eduardo Battaner López*..... 35

### **ABSORCIÓN DE LA LUZ POR EL AGUA. ZONAS LUMINOSA Y AFÓTICA DE LOS OCÉANOS**

*José Carlos García Gómez e Isabel Cárdenas Marcial* ..... 43

### **BIOLUCES MISTERIOSAS EN EL MAR. FLUORESCENCIA Y BIOLUMINISCENCIA**

*José Carlos García Gómez e Isabel Cárdenas Marcial* ..... 51

### **LA LUZ COMO FUENTE DE ENERGÍA. ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA**

*Antonio Gómez Expósito*..... 59

<b>RAYOS X. UNA RADIACIÓN MISTERIOSA</b> <i>F. Javier Fernández Mena</i> .....	67
<b>LA RADIACIÓN GAMMA. LA LUZ MÁS PENETRANTE</b> <i>Yolanda Morilla García</i> .....	75
<b>EL LÁSER. UNA LUZ PARA EL FUTURO</b> <i>Enrique F. Hita Villaverde</i> .....	83
<b>LA PERCEPCIÓN DE LA LUZ POR EL SISTEMA VISUAL HUMANO</b> <i>Javier Romero Mora</i> .....	91
<b>ÁREAS VISUALES CENTRALES Y LA CONSTRUCCIÓN DE LAS IMÁGENES POR EL CEREBRO</b> <i>José López Barneo</i> .....	99
<b>LA LUZ EN LA VISIÓN Y EN LA OFTALMOLOGÍA</b> <i>Fernando Orellana Ramos</i> .....	107
<b>BASES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA COLORACIÓN</b> <i>Rosario Fernández Fernández</i> .....	115
<b>LA LUZ Y LA REPRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS CON FLORES. LOS COLORES DE LAS FLORES Y DE LOS FRUTOS</b> <i>Benito Valdés Castrillón</i> .....	123
<b>LOS ANIMALES Y LA LUZ. LA PERCEPCIÓN DEL COLOR POR LOS ANIMALES</b> <i>Pedro D. Jordano Barbudo</i> .....	131
<b>LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. UNA QUÍMICA BRILLANTE</b> <i>Miguel Ángel de la Rosa Acosta e Irene Díaz Moreno</i> .....	139

<b>LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. FOTOSÍNTESIS, UN RETO PARA EL HOMBRE</b>	
<i>Miguel Ángel de la Rosa Acosta e Irene Díaz Moreno.....</i>	147
<b>LA LUZ Y EL MUNDO MICROBIANO</b>	
<i>Antonio Ventosa Ucero y Cristina Sánchez-Porro Álvarez .....</i>	155
<b>LA EXPLOSIÓN DE VIDA EN LA DENSA OSCURIDAD DE LOS AMBIENTES BIOTERMALES ABISALES</b>	
<i>Víctor Díaz-del-Río Español.....</i>	163
<b>¿VIDA LEJOS DE LA TIERRA?</b>	
<i>Alberto J. Castro Tirado .....</i>	171
<b>EPÍLOGO</b>	
<i>Benito Valdés Castrillón y Enrique F. Hita Villaverde.....</i>	179





# **PRESENTACIÓN**

ANTONIO PULIDO GUTIÉRREZ  
*Presidente de la Fundación Cajal*



## PRESENTACIÓN

ANTONIO PULIDO GUTIÉRREZ  
*Presidente de la Fundación Cajazol*

**EL DÍA INTERNACIONAL DE LA LUZ TIENE ESTE AÑO** su epicentro nacional en Andalucía, una buena noticia que estamos celebrando y ayudando a impulsar de la mano de un buen número de instituciones y expertos que nos hemos aliado para la ocasión capitaneados por el Instituto de Academias de Andalucía.

La exposición que recogemos en este catálogo constituye el acto central de esta conmemoración que rinde homenaje al papel protagonista que las tecnologías de la luz han tenido históricamente en el desarrollo de la ciencia y en el bienestar humano. Una muestra llamada a ser un instrumento de divulgación del conocimiento en esta área enfocado principalmente a la comunidad educativa, que va a poder sacar un gran partido a los contenidos de un proyecto que nace con vocación itinerante.

La participación de la Fundación Cajazol en esta iniciativa entra de lleno en la apuesta que venimos haciendo por la difusión y la creación de cultura en colaboración con otras entidades. En este caso, nos estamos refiriendo a la fundamental divulgación de la cultura científica a la que le debemos tantos avances de la sociedad. Una labor compartida, la de informar y formar de manera entretenida, que logra muy hábilmente esta muestra que enciende la luz y nos la descubre desde múltiples prismas.

*Mayo, 2023*



# PRÓLOGO

BENITO VALDÉS CASTRILLÓN

*Presidente del Instituto de Academias de Andalucía*

&

ENRIQUE F. HITA VILLAVERDE

*Vicepresidente Primero del Instituto de Academias de Andalucía*



# PRÓLOGO

BENITO VALDÉS CASTRILLÓN

*Presidente del Instituto de Academias de Andalucía*

&

ENRIQUE F. HITA VILLAVERDE

*Vicepresidente Primero del Instituto de Academias de Andalucía*

**EN 2015 SE CELEBRÓ EL AÑO INTERNACIONAL** de la Luz y las Tecnologías Basadas en la luz, surgiendo a lo largo del año importantes contactos y colaboraciones entre expertos en tecnología y científicos especializados en temas relacionados con la luz. Fue un gran éxito y para mantener y estimular estas relaciones, la UNESCO acordó en noviembre de 2017 declarar el 16 de mayo Día Internacional de la Luz (Resolución 39 C/40), haciéndolo coincidir con el día en el que, por primera vez, en 1960, el físico Theodore H. Maiman puso en funcionamiento un láser de rubí que tenía capacidad de amplificar la luz por emisión estimulada de radiación.

Para potenciar estas relaciones, se creó en nuestro país el Comité Español del Día Internacional de la luz, que impulsa cada año la celebración del Día Internacional de la Luz en una de nuestras ciudades o Comunidades, como ha sido en este caso la elección de Andalucía (Granada y Sevilla).

Como parte de la celebración de 2023, y con el patrocinio de la Fundación Cajasol, el Instituto de Academias de Andalucía ha organizado esta Exposición, en cuya preparación han intervenido académicos e investigadores de las Instituciones que se relacionan en las páginas 5 y 6.

El Instituto de Academias de Andalucía quiere mostrar muy sinceramente su agradecimiento a todas las instituciones colaboradoras,

y muy particularmente a los investigadores que han intervenido en la preparación tanto de la exposición como de este catálogo. Gracias a su participación desinteresada, se dispone de una magnífica herramienta de divulgación del conocimiento sobre diversos temas físicos y biológicos relacionados con la luz, en los que los distintos autores están especializados. Contribuirán no sólo a informar sobre estos temas al público en general, sino, posiblemente, a ayudar a formar en estos aspectos a alumnos y profesores de los centros docentes en los que pueda mostrarse esta exposición en un futuro próximo.



# INTRODUCCIÓN

MARÍA JOSEFA YZUEL GIMÉNEZ

*Presidenta del Comité Español del Día Internacional de la Luz, Académica Numeraria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona; Académica Correspondiente de las Academias de Ciencias Matemáticas, Físico-químicas y Naturales de Granada y de Ciencias de Zaragoza. Profesora Emérita de la Universidad Autónoma de Barcelona*



# INTRODUCCIÓN

MARÍA JOSEFA YZUEL GIMÉNEZ

*Presidenta del Comité Español del Día Internacional de la Luz. Académica Numeraria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona; Académica Correspondiente de las Academias de Ciencias Matemáticas, Físico-químicas y Naturales de Granada y de Ciencias de Zaragoza. Profesora Emérita de la Universidad Autónoma de Barcelona*

**EN ESTE AÑO 2023, EL ACTO CENTRAL** de la celebración en España del Día Internacional de la Luz (DIL) tiene lugar en Andalucía y está organizado por el Instituto de Academias de Andalucía, con la contribución de diferentes academias andaluzas e instituciones como las Universidades de Sevilla y de Granada y el apoyo de la Fundación Cajasol, la División de Enseñanza y Divulgación de la Física de la Real Sociedad Española de Física (RSEF), la Sociedad Española de Óptica (SEDOPTICA) y de la Fundación Descubre. Quiero agradecer a dichas entidades su valiosa colaboración y a las empresas Lasing y MTB por su contribución.

Estamos ante una magnífica oportunidad para dar a conocer a la sociedad la importancia que la ciencia y las tecnologías basadas en la luz tienen en el desarrollo del conocimiento y en el bienestar de la humanidad. De esto da muy bien cuenta una de las actividades programadas, que consiste en una exposición que lleva el título de “Luz y Vida” y que abarca 20 paneles sobre temas que van desde la naturaleza de la luz hasta la relación de la luz y la vida y presenta también conceptos fundamentales tales como la visión, el color etc. Quiero agradecer a los Excelentísimos Señores Profesores Benito Valdés y Enrique Hita que, como miembros del Comité Español del Día Internacional de la Luz, hayan aceptado la responsabilidad de llevar a cabo la organización

de las actividades con las que se celebra en Sevilla y en Granada el Acto Central en España del Día Internacional de la Luz en 2023. Y les agradezco que me hayan invitado a escribir una introducción para este catálogo que se edita acompañando a la exposición “Luz y Vida”. Para mí es un gran honor representar al Comité Español del Día Internacional de la Luz participando en este cometido.

El Día Internacional de la Luz es una iniciativa global que fue aprobada por la UNESCO en 2017 y que promueve una celebración anual con el fin de incrementar el conocimiento que la sociedad tiene del papel crucial que la ciencia de la luz y las tecnologías basadas en la luz representan en el mundo actual, en campos tan diversos como la iluminación, la óptica, la medicina, la producción de energía, la información y las comunicaciones, la agricultura, la biología, la astronomía, el arte o el desarrollo sostenible, entre otros muchos. Se trata de un proyecto educacional y de divulgación que ayudará a atraer talento de jóvenes estudiantes a carreras de ciencias e ingenierías. A nivel internacional es un evento administrado por el Programa Internacional de Ciencia Básica (IBSP) de la UNESCO y gestionado desde el International Day of Light Secretariat (<https://www.lightday.org/>). En España, el Día Internacional de la Luz se coordina desde un Comité (ver: <https://www.diadelaluz.es/>) que tengo el honor de presidir y que agrupa a los principales agentes relacionados con la ciencia y las tecnologías de la luz, tales como sociedades científicas, centros de investigación, universidades, plataformas tecnológicas, empresas, etc.

La primera celebración del Día Internacional de la Luz tuvo lugar el día 16 de mayo de 2018, en la Sede General de la UNESCO en París. En España, se ha realizado un Acto Central anual de celebración de este día; así, en 2018 este acto tuvo lugar en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, en 2019 en la Universidade de Santiago de Compostela, no pudo celebrarse de forma presencial en 2020 por las limitaciones impuestas por la pandemia, pero se retomó en 2021 celebrando dicho Acto Central en Terrassa, organizado por la Escuela de Óptica y Optometría de la Univesitat Politècnica de Catalunya, y en 2022 tuvo lugar en Valladolid, organizado por la Universidad de Valladolid y con la colaboración del Museo de la

Ciencia de Valladolid. Afortunadamente, tenemos la continuidad este año 2023 con la celebración en Andalucía del Acto Central del Día Internacional de la Luz.

Esta celebración comprende varias actividades: en primer lugar, la exposición que ya he mencionado, que lleva por título “Luz y Vida” y cuyo catálogo tienen en sus manos; además, habrá dos ciclos de conferencias interacadémicas, que se celebrarán en Granada y Sevilla, con los títulos: “Luz y salud: terapias luminosas avanzadas” para el ciclo de Granada y “La Luz y el origen de la vida” para el ciclo de Sevilla. Además, se añadirá una actividad que consistirá en charlas apoyadas de demostraciones en el Parque de las Ciencias de Granada, que llevará como título “El manejo de la luz: Información luminosa y sus aplicaciones”.

El Día Internacional de la Luz se celebra el 16 de mayo de cada año, en conmemoración de la primera emisión de luz láser que tuvo lugar el 16 de mayo de 1960 y fue obtenida por Theodore Maiman con un láser de rubí. Justamente el láser es un ejemplo paradigmático de cómo un descubrimiento científico relacionado con la luz proporciona herramientas revolucionarias en diversos campos como las comunicaciones, las tecnologías de la salud, la industria, etc. Uno de los paneles de esta exposición explica qué es el láser, su desarrollo y sus aplicaciones.

Cuando la ONU declaró el 2015 como Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz, reconoció la importancia de la luz y de las tecnologías basadas en la luz para la vida de los ciudadanos y para el desarrollo futuro de la sociedad global a muy diversos niveles, y destacó que el aumento de la concienciación mundial y el fortalecimiento de la enseñanza de la ciencia y las tecnologías de la luz son esenciales para abordar retos tales como el desarrollo sostenible, la producción de energía y la mejora y sostenimiento de la salud de las comunidades. Se habló también de la contribución de este evento para mejorar la calidad de vida en los países desarrollados y en los países en vías de desarrollo. Ya hemos visto a lo largo de las últimas décadas, cómo los avances en ingenierías basadas en la luz han sido esenciales para importantes logros ya alcanzados y lo serán, sin duda, para futuros

desarrollos en campos cruciales para el bienestar de la humanidad. Las tecnologías basadas en la luz hacen posible el logro de varias metas del desarrollo sostenible convenidas a nivel internacional, entre otras proporcionando mejor acceso a la información y aumentando la salud y el bienestar de la sociedad. Se ha visto también cómo estas tecnologías pueden desempeñar un papel importante en el logro de una mayor eficiencia energética, en particular utilizando fuentes de energía alternativas y usando lámparas como los LEDs que son de menor consumo. Además, afectará a la reducción de la contaminación lumínica, que es fundamental para la conservación de cielos oscuros, que mejoran las condiciones para las observaciones astronómicas.

El 14 de noviembre de 2017 la UNESCO, en la 39ª sesión de su Conferencia General, aprobó que a partir de 2018 se celebrara anualmente el 16 de mayo, el Día Internacional de la Luz (DIL). Esta declaración fue un legado del Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz y se apoyaba en el éxito alcanzado con las numerosas e interesantes actividades que tuvieron lugar a nivel internacional, y también en España, durante 2015, las cuales cumplieron los objetivos marcados, pero pusieron de manifiesto el interés de repetir anualmente actividades que recuerden la importancia de la ciencia y de las tecnologías basadas en la luz en el bienestar de la humanidad. Ahora celebramos el Día Mundial de la Luz, dando una visión mucho más amplia, que nos permite añadir a los objetivos que se buscaron en 2015 otros como la relación de la luz y la vida, la luz y el arte, la luz y la cultura, entre otros muchos, lo que permite ampliar los objetivos, introduciendo todos aquellos campos en los que para su desarrollo el concepto de la luz es fundamental.

Los paneles de esta exposición cubren muchos de los objetivos de la celebración del Día Internacional de la Luz. Sin duda, el público que visite esta exposición verá enriquecido su bagaje de cultura científica y se sentirá atraído por la belleza de los paneles y de sus contenidos científicos. Tenemos paneles que cubren conceptos básicos como la naturaleza de la luz, conocer el universo por medio de la luz o la luz y el origen de la vida; otros giran alrededor de la visión cubriendo

temas como la percepción de la luz por el ojo humano, percepción del color, áreas visuales cerebrales, la luz en la visión y en oftalmología o la percepción de la luz por los animales; los hay que tratan el color desde diferentes aspectos tales como: los colores naturales, los colores de las plantas o la base molecular de la coloración. Hay varios paneles que relacionan la luz y la vida, como el ya mencionado sobre la luz y el origen de la vida y los que nos describen la transformación de la energía lumínica en energía química (la fotosíntesis), o el origen de la vida en ausencia de luz, organismos extremófilos o fuentes energéticas abisales. También en un panel se nos hace la pregunta de si es posible la vida fuera de la Tierra, mientras en otros, partiendo del estudio de la absorción de la luz por el agua, nos plantean las zonas luminosa y afótica de los océanos y la luz en las profundidades abisales. No quedan fuera de la exposición otros tipos de radiación electromagnética como son los rayos X o la radiación gamma y el papel de la ozonfera. De indudable interés resulta el conocer la base científica y las aplicaciones del láser y el aprovechamiento de la luz como fuente de energía, generando la energía fotovoltaica.

Estos magníficos paneles han sido escritos y diseñados por excelentes expertos, que son científicos de las Academias de Ciencias, de Farmacia y de Medicina de Andalucía y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y profesores de las Universidades de Sevilla y de Granada; sus nombres constan en las páginas 5 y 6 de este catálogo, así como en cada uno de los paneles, y no los repito aquí por no alargar esta introducción. A todos ellos mi enorme agradecimiento por su trabajo en la generación de los paneles y en los artículos que contiene este catálogo, que serán una fuente de inspiración y de conocimiento para los que visiten la exposición. Mi deseo es que esta exposición pueda viajar a distintas ciudades y diferentes instituciones para que llegue a todo el público interesado, independientemente de su edad. Esta exposición será también inspiración para trabajos que realicen estudiantes, maestros y profesores de Institutos de Enseñanza Secundaria, para lo que el Instituto el Instituto de Academias de Andalucía pone estos paneles y este catálogo a disposición de los centros educativos y de las entidades culturales andaluzas a través de la Fundación Descubre.





# LA NATURALEZA DE LA LUZ. UN APASIONANTE HITO EN LA HISTORIA DE LA CIENCIA

LUIS M. JIMÉNEZ DEL BARCO JALDO

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.*



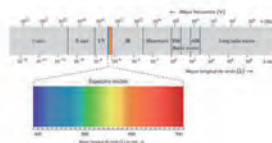
Ilustración de la portada de una edición latina del libro de De Aspectibus o Opticæ Thesaurus de Alhazen, mostrando cómo Arquímedes ingenió prender fuego a los barcos romanos en su ataque a Siracusa.  
Imagen en [www.allamy.com](http://www.allamy.com)



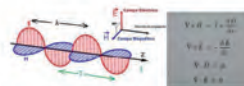
Los grandes protagonistas en el estudio de la naturaleza de la luz.: Kepler, Descartes, Fermat, Grimaldi, Newton., Huygens, Young, Fresnel, Maxwell, Hertz , Planck, Einstein , Schrödinger, De Broglie.



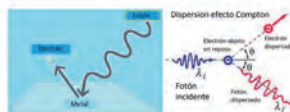
Manuscrito original de "Opticks or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light" de Isaac Newton.



Espectro de la radiación electromagnética



Representación gráfica de una onda electromagnética (o.e.m.) y ecuaciones de Maxwell.



Dispersion efecto Compton

Izquierda: representación esquemática del efecto fotoeléctrico. Derecha: representación esquemática del efecto Compton.



Uno de los logros del siglo XX: la radiación LASER (laboratorio con los diez experimentos más bellos de la Física. Universidad de Granada)



# **LA NATURALEZA DE LA LUZ. UN APASIONANTE HITO EN LA HISTORIA DE LA CIENCIA**

LUIS M. JIMÉNEZ DEL BARCO JALDO

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.*

**EL MUNDO DE LA LUZ ES UN MARAVILLOSO CAMPO** de estudio inabordable desde una única perspectiva, pero sin lugar a dudas ha sido, y sigue siendo, uno de los aspectos que a lo largo de la historia de la ciencia ha despertado mayor interés. El estudio de su naturaleza física ha dado lugar a diferentes teorías, controversias y debates científicos, en los que la conjunción de los resultados experimentales con la modelización teórica, han sido todo un referente en la generación y construcción científica del conocimiento. Esta temática ha abierto capítulos apasionantes en la historia de la ciencia que van desde la etapa pre-científica, hasta su naturaleza dual onda-partícula, ampliamente asentada y corroborada dentro del paradigma científico actual. En lo que sigue, se expondrán los hitos más relevantes que han llevado a las concepciones actuales, así como algunos de los logros inherentes a la naturaleza de la luz y de los retos en un futuro próximo.

## **ONDAS O CORPÚSCULOS: MÁS DE TRES SIGLOS EN LA HISTORIA DE LA FÍSICA**

La naturaleza de la luz ha constituido uno de los debates históricos de mayor relevancia, presentado un especial interés los acontecimientos históricos sobre este hecho. La influencia de las escuelas griegas, etapa pre-científica, para explicar la interacción *luz-objeto-sistema visual*, en las diversas teorías,

a veces contrapuestas, sobre *intrusión* (la percepción visual es originada a partir de “rayos visuales” emitidos por los ojos) y *extrusión* (la visión proviene de “algo” capaz de representar los objetos que se introduce en los ojos), llegó hasta la ciencia moderna de Isaac Newton.



**Fig. 1. Izquierda, portada de la traducción latina del Libro de Óptica de Ibn al-Haytham titulado *Opticae Thesaurus, Alhazeni Arabis Libri Septem* (El tesoro óptico, siete libros árabes de Alhazen) que se publicó en Basilea, en 1572. Derecha, ilustración de la portada de una edición latina del libro de Óptica *De Aspectibus* o *Opticae Thesaurus* de Alhazen, mostrando cómo Arquímedes ingenió prender fuego a los barcos romanos en su ataque a Siracusa (Imagen en [www.alamy.com](http://www.alamy.com)).**

Con anterioridad a la ciencia moderna, en el florecimiento de la ciencia árabe, en la conocida Edad de Oro islámica (siglo VIII a mitad del siglo XII), se realizaron contribuciones importantes a las teorías de la luz y la visión. Según algunos autores se puede considerar al matemático, físico y astrónomo Ibn al-Haytham, conocido como Alhacén de Basora (Basora, actual Irak, 965-El Cairo, Egipto, 1040) como el “padre” de la Óptica, de la Oftalmología y de la Física Moderna, basando sus conclusiones, a diferencia que los clásicos griegos, no solo en el pensamiento teórico sino

también en la experimentación. Llegó a afirmar que “*desde cada punto de un cuerpo coloreado, iluminado por una luz, salen luz y color en cada línea recta que pueda ser trazada desde ese punto*”. Alhacén formula por primera vez la síntesis de las teorías de intromisión y extramisión: la luz irradiada por el sol se refleja en los objetos y llega a los ojos. Sus contribuciones en la obra *Kūtab al-Manazir* (Tratado de Óptica), sentaron las bases de desarrollos posteriores por el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler (Ratisbona 1571-1630). En su libro I, de los siete que componen la obra, Alhacén de Basora trató sobre las teorías de la luz, el color y la visión.

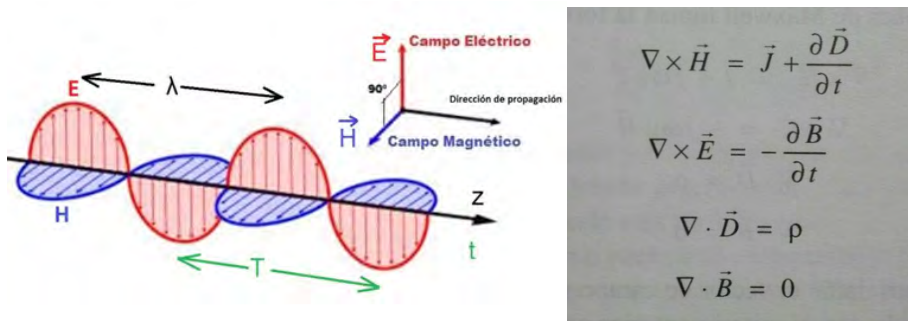
La transmisión de la ciencia y del pensamiento árabe hacia Europa en los siglos XV, XVI y XVII, contribuyó al florecimiento de nuevas ideas y estudios sobre la naturaleza de la luz y de los fenómenos asociados a la misma. Junto a las aportaciones de Kepler, destacaron las de René Descartes (1596-1650), Pierre de Fermat (1601-1665), Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), Isaac Newton (1643-1727), Christiaan Huygens (1629-1695), Thomas Young (1773-1829), Augustin-Jean Fresnel (1788- 1827), James Clerk Maxwell (1831-1879), Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955), Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961) y Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987).

El carácter corpuscular de la luz fue planteado y sostenido durante decenas de años por Isaac Newton, explicando la refracción, reflexión y dispersión cromática de la luz. Cabe reseñar su gran obra *Opticks* publicada en 1704. A pesar de alguna inconsistencia, la gran autoridad y peso científico de Newton llevó que se mantuviese la naturaleza corpuscular frente a evidencias experimentales de su naturaleza ondulatoria, como fueron los fenómenos de interferencias luminosas observados por Young, la explicación de la propagación de la luz por Huygens y la difracción estudiada por Grimaldi y Fresnel.

## **NATURALEZA DUAL: ONDA ELECTROMAGNÉTICA-FOTÓN**

La naturaleza de la luz como onda electromagnética quedó bien establecida por J.C. Maxwell en su teoría clásica de la radiación

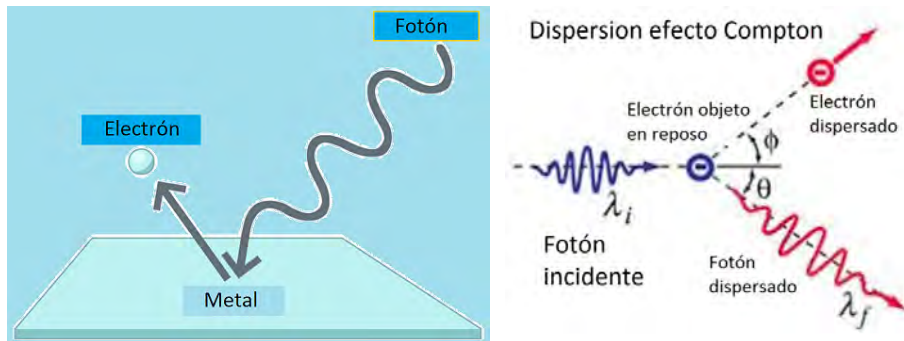
electromagnética, publicada en 1865 y ratificada experimentalmente por Hertz en 1888 al comprobar que las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el aire y en el vacío con una velocidad muy próxima a la predicha por Maxwell, de 300.000 km/s. La electrodinámica clásica, partiendo de las ecuaciones de Maxwell, explica, con suficiente capacidad predictiva, los fenómenos de propagación de la luz, la polarización, las interferencias y la difracción.



**Fig. 2. Representación gráfica de una onda electromagnética (o.e.m.) y ecuaciones de Maxwell. El carácter transversal de las o.e.m., inherente a los fenómenos de polarización, contribuyó experimentalmente a afianzar la naturaleza ondulatoria de la luz.**

Con posterioridad, en 1887, Hertz descubre el *efecto fotoeléctrico* al comprobar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando está en la oscuridad. La explicación teórica fue formulada por Einstein, quien en 1905 publicó el revolucionario artículo *Heurística de la generación y conversión de la luz*, formulando la fotoelectricidad como una extensión del trabajo sobre los cuantos de Planck (Premio Nobel de Física en 1918). Einstein fue galardonado con el Premio Nobel en 1921: la luz también poseía propiedades de partículas, y la partícula asociada es el fotón. Robert Andrews Millikan experimentó durante diez años para concluir que la teoría de Einstein era correcta, valiéndole la concesión del Premio Nobel en 1923.

Desde la teoría de los cuantos de Max Planck y la síntesis de las teorías corpusculares y ondulatorias de la luz, formulada por Luis de



**Fig. 3. Izquierda, representación esquemática del efecto fotoeléctrico. Derecha, representación esquemática del efecto Compton.**

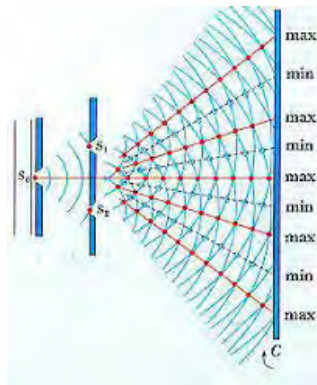
Broglie en 1925 (Premio Nobel de Física en 1929), asociando a un cuerpo en movimiento una longitud de onda dada por  $\lambda=h/mv$  (siendo  $m$  su masa,  $v$  la velocidad y  $h$  la constante de Planck), quedó bien establecida la naturaleza dual de la luz: *toda la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares comportándose de uno u otro modo dependiendo del experimento específico*. La partícula asociada a la radiación electromagnética luminosa es el fotón con una energía dada por  $E=h\nu$ , siendo  $h$  la constante de Planck ( $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J.s.) y  $\nu$  la frecuencia de la onda electromagnética. Los fenómenos relativos a la propagación de luz pueden estudiarse satisfactoriamente, con buena capacidad predictiva, mediante la naturaleza electromagnética de la luz. La naturaleza corpuscular se pone de manifiesto, en mayor grado, en los fenómenos de interacción de luz con la materia. Más adelante, la difracción de electrones fue predicha y demostrada en dos experimentos independientes. George Paget Thomson haciendo pasar un haz de electrones a través de una capa delgada de metal, observó los patrones interferenciales predichos. El otro experimento lo realizaron Clinton Joseph Davisson y Lester Halbert Germer haciendo pasar un haz de electrones a través de una red cristalina, demostrando la difracción que experimentaban. Thomson y Davisson compartieron en 1937 el Premio Nobel de Física.

Otro experimento fundamental que mostró la naturaleza corpuscular de la radiación es el *efecto Compton*, observado por Arthur Holly Compton (1892 -1962), mereciéndole el Premio Nobel de Física en 1927 al demostrar que en la dispersión de rayos X por electrones atómicos,

bajo determinadas circunstancias, se presenta radiación dispersada con una longitud de onda mayor a la incidente (corrimiento Compton). Desde entonces, han sido muchos más los Premios Nobel relacionados con los logros de las nuevas tecnologías asociadas a la luz.

### UNO DE LOS EXPERIMENTOS MÁS BELLOS DE LA FÍSICA: LAS INTERFERENCIAS Y DIFRACCIÓN EN DOBLE RENDIJA DE YOUNG COMO EVIDENCIA DEL “MUNDO CUÁNTICO”

En 2003, la revista *Physics World* consultó a sus lectores cuál era en su opinión el experimento más bello de la historia de la física. Ganó el célebre experimento de la doble rendija ideado por Thomas Young en 1801 para probar la naturaleza ondulatoria de la luz que no ha dejado de repetirse, en diversos formatos y con distintos objetivos, hasta la



**Fig. 4. Experimento de la doble rendija de Young**

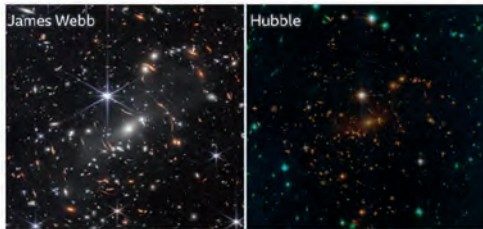
actualidad. Cada partícula de la naturaleza, sea fotón, electrón, átomo, puede describirse en términos de la solución de la ecuación diferencial de ondas de Schrödinger (en el caso no relativista, o la ecuación de Dirac en el caso relativista), funciones que tienen carácter probabilístico. Estas soluciones son funciones matemáticas llamadas funciones de onda. Las funciones de onda contienen información sobre el comportamiento cuántico de las partículas que se pueden difractar e interferir unas con otras e incluso consigo mismas.



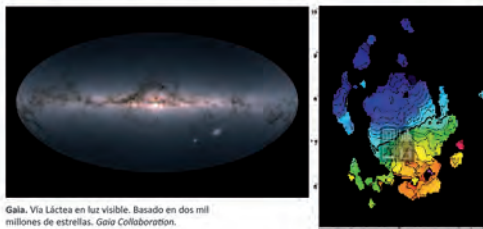
# CONOCER EL UNIVERSO POR MEDIO DE LA LUZ

EDUARDO BATTANER LÓPEZ

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*



James Webb y Hubble. Cielo profundo. Comparación. James Webb, NASA & ESA



Gala. Via Láctea en luz visible. Basado en dos mil millones de estrellas. Gaia Collaboration.

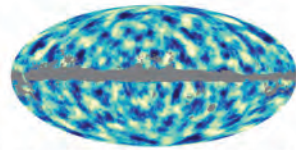
Por efecto Doppler, la rotación de una galaxia (rojo, blanco, azul) recuerda a una bandera francesa. Imagen propia.



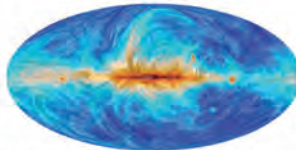
Quinteto Stephan. James Webb, NASA & ESA



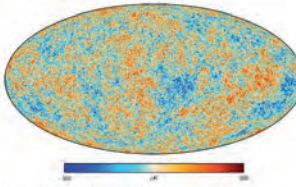
Trífida. Región HII. Color negro: nacerán estrellas; rojo, están naciendo; azul: ya han nacido. Wikipedia Commons: Dylan O'Donnell.



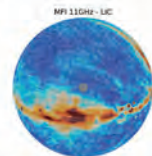
Mapa completo de materia oscura. Con luz visible podemos conocer la materia oscura. Planck and Planck Collaboration.



Planck sincrotrón polarizada. Campo magnético de la Via Láctea. Planck and Planck Collaboration.



Fondo cósmico de Microondas. Universo con edad 380.000 años. Planck and Planck Collaboration.



MR11\_lic\_orth. Campo magnético de la Via Láctea. Quijote Collaboration.



# CONOCER EL UNIVERSO POR MEDIO DE LA LUZ

EDUARDO BATTANER LÓPEZ

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*

**NUESTRA FUENTE DE INFORMACIÓN MÁS IMPORTANTE** para estudiar el Universo es la luz. Recibimos fotones que cubren todo el espectro electromagnético: ondas de radio, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. ¿De qué información adicional disponemos? De muy poca más: meteoritos, neutrinos, rayos cósmicos, viento solar, ondas gravitatorias, Marte, la Luna, la Tierra (que está también en el Universo), un cometa....

Pero todo lo demás que tenemos son fotones, los corpúsculos de la radiación electromagnética. Con los fotones, prácticamente en exclusiva, hemos de conocer el Universo: los astros y las regiones interestelares y preestelares, lo que se ve y lo que no se ve. Y hemos de conocer no sólo el presente sino el pasado, hasta llegar muy cerca de su principio. La luz visible, para la cual el ojo humano es sensible, fue la primera en incorporarse al descubrimiento del Universo y nos ha proporcionado el conocimiento inicial y esencial.

Como los desplazamientos al rojo pueden ser tan grandes en el Cosmos, el concepto de “luz visible” se agranda. Podemos ver la raya ultravioleta de Lyman-alfa que se emite a 121,5 nm en nuestros fotómetros de luz visible. Y lo que se emitió en el rango visible del espectro, lo tenemos que estudiar en ocasiones con tecnología de microondas.

Sabemos cuántos fotones recibimos en cada frecuencia (espectro), dos ángulos que nos indican la procedencia (por ejemplo, declinación y ascensión recta) y poco más. Sí; hay algo más: la luz

puede estar polarizada, y la polarización de la luz es otra gran fuente de información.

De todos los fotones sólo llegan a la superficie de la Tierra los de radio y los de la luz visible, con algunas “ventanas” más en el infrarrojo, pequeñas y muy contaminadas por la atmósfera. Pero hoy disponemos de misiones espaciales que nos permiten sondear todo el espectro electromagnético. La atmósfera es una fuente de deformación de la señal recibida que, gracias a las misiones espaciales, podemos eludir.

Tenemos teorías físicas, siendo la teoría de la Relatividad la más útil para estudiar el Cosmos. Pero para hacer física, necesitamos situar lo que estudiamos, debemos situar los astros en el espacio y debemos situarlos en el tiempo. Para situarlos en el espacio necesitamos conocer a qué distancia están. La historia de la astrofísica coincide con la de los métodos que tenemos para conocer las distancias, que no podemos resumir en tan breve artículo.

En la divulgación se suele emplear como unidad de distancia el “año-luz”. ¡Hermoso término para recordar en el Día Internacional de la Luz!: la distancia que tarda en recorrer la luz en un año. En astrofísica profesional se suele emplear el “parsec” (1 parsec es aproximadamente  $3 \times 10^{16}$  metros, unos 3 mil billones de metros, unos 3,26 años-luz). También es conveniente utilizar el Mega-año-luz, un millón de años-luz, “Mal”, o el giga-año-luz, mil millones de año-luz, “Gal”.

Los métodos de determinación de distancias se suelen comparar con los peldaños de una escalera. Cada peldaño es un método que se basa en el anterior. El primer peldaño es medir la Tierra, como ya lo hizo Eratóstenes. El segundo, determinar la distancia al Sol, como lo intentó Aristarco de Samos.

Las primeras distancias obtenidas directamente a las estrellas próximas se basaron en un método que ya usa el hombre instintivamente para determinar distancias cortas con los dos ojos. Éstos no apuntan en la misma dirección y del pequeño ángulo entre ambas direcciones, el hombre obtiene (subjetivamente) las distancias. Si nuestros ojos estuvieran más separados el método sería más sensible. Se trata de una triangulación, tanto más sensible cuanto mayor sea la separación entre los dos puntos de observación. Y ¿cuál es la mayor separación entre

telescopios para hacer la triangulación? El doble de la distancia Sol-Tierra. Hacemos una medida de la posición de la estrella y la repetimos 6 meses después. Hasta 1846 no logró F. W. Bessel determinar así la distancia a una estrella. Hoy sabemos que las que vemos a simple vista en el firmamento están en torno a 10 años-luz. La estrella más cercana, “Proxima Centauri”, está a unos 4 años-luz.

Claro que la estrella más cercana es en realidad el Sol, que está a unos 8 minutos-luz. Cuando miramos al Sol no lo vemos donde está, sino donde estaba hace 8 minutos, que dada la velocidad angular del Sol ( $360^\circ/24\text{h}$ ), visto desde la Tierra, es equivalente a una diferencia de posición de unas tres veces el propio diámetro angular del Sol. Cuando decimos que hay un eclipse, éste no se corresponde a una alineación real Tierra-Sol-Luna, porque el Sol ya no está donde parece estar. La Luna prácticamente sí, pues está sólo a poco más de un segundo-luz. Cuando decimos que el Sol se pone, hace ya un tiempo que se ha puesto. (Hay además un efecto de refracción de la atmósfera que hace que lo veamos también retrasado, una distancia angular más o menos equivalente al diámetro angular del Sol (medio grado, aproximadamente). En cambio, en el orto vemos salir al Sol antes de que lo haga geoméricamente.

Este retraso entre lo real y lo que vemos se agudiza cuando observamos astros muy lejanos. La galaxia de Andrómeda (el objeto más lejano observable a simple vista) está a unos 2,5 millones de años-luz. Hoy vemos lo que se emitió en la época de los *Australopithecus*. Hoy vemos astros que ya dejaron de existir.

Para hablar en términos físicos, necesitamos hablar también de velocidades. Conocemos bien las de los planetas. De las estrellas, sólo conocemos *movimientos propios*, es decir, los perpendiculares a la línea de visión, de muy pocas estrellas muy cercanas. En cambio, conocemos muy bien los movimientos de alejamiento o acercamiento de las estrellas gracias al efecto Doppler. Lo que ocurre con el sonido (un coche se acerca con aullido de rata y se aleja con rugido de león) pasa a la luz. Si un astro se aleja, su luz se *enrojece*, es decir, su luz se desplaza a longitudes de onda más largas. Si se acerca, su luz se *azulea*.

Pero la astrofísica no se limita al estudio de los astros. Tan importante como los astros son los medios interestelares, intergalácticos

y pregalácticos (porque la existencia de estrellas y galaxias es algo bastante reciente en la historia del Universo). Para ello, hay que utilizar otras longitudes de onda. Particularmente, las ondas de radio nos proporcionan mucha información. Una gran parte de los fotones del Universo tienen una longitud de onda de 21 cm, claramente no visibles al ojo humano. Además, es muy importante la radiación llamada *sincrotrón*, que está polarizada y que nos informa de la otra gran fuerza que mueve el Cosmos: el magnetismo. Precisamente, el descubridor de la radiación sincrotrón polarizada fue Richard Wielebinski, miembro correspondiente de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.

Cuando se empezaron a medir distancias de alejamiento o acercamiento de galaxias se encontró que, exceptuando unas pocas galaxias muy próximas, todas se alejaban. Se descubrió entonces la expansión del Universo, y se observó, además, que las más lejanas se alejaban más deprisa. Esto lo descubrió G. Lemaître (¡no E. Hubble!) y es lo que hoy ya se llama ley de Hubble-Lemaître. Pero este enrojecimiento no era un efecto Doppler.

Hay tres tipos de enrojecimiento, o *redshift*, o *desplazamiento al rojo*, denotados con la letra  $z$ :

- Desplazamiento Doppler por el efecto real de alejamiento de la fuente emisora.
- Desplazamiento Cosmológico, que corresponde a un “estiramiento” de la métrica del espacio-tiempo, según el cual, “las galaxias se alejan sin moverse”.
- Desplazamiento gravitatorio. Una luz se enrojece si está emitida en el seno de un campo gravitatorio (pierde energía al salir del pozo gravitatorio. Fue propuesto por Einstein para probar la teoría de la relatividad).

Al hablar de grandes distancias, los astrofísicos prefieren hablar de  $z$  más que de distancias, porque  $z$  se determina muy objetivamente y, en cambio, su relación con la distancia depende del modelo teórico adoptado.

Gracias al desplazamiento al rojo, los astrofísicos podemos ver el ultravioleta con nuestros ojos. El ultravioleta se mete en la región visible del espectro de radiación electromagnética.

La imagen del Universo más primitivo, obtenida muy recientemente por la misión espacial Planck nos muestra los tres tipos de desplazamiento al rojo. Cuando se produjo, la luz era “visible”, era una luz rojiza, pero debido al desplazamiento al rojo cosmológico hoy lo vemos en microondas (longitud de onda en torno a 1 mm).

Las imágenes que nos ha ofrecido la misión PLANCK, o el telescopio QUIJOTE en Tenerife, nos hacen ver lo que veríamos si hubiéramos estado allí viviendo y observando cuando el Universo sólo tenía 380.000 años de edad. Claro que entonces veríamos una pequeña parte y, hoy, visto desde tan lejos, vemos el mapa de todo el Universo de entonces. Pero, en definitiva, estamos viendo lo que fue visible, una luz rojiza, correspondiente a un cuerpo negro a unos 3.000 K (grados kelvin), y dejó de serlo debido al desplazamiento al rojo por la expansión del Universo.

Pero la imagen tiene “manchas”, *anisotropías* de distintos tamaños. Las de menos de un grado, aproximadamente, se deben al efecto Doppler debido a las velocidades originadas por el sonido (¡Sí; podemos ver el sonido, que, además, es, más bien, música!). En cambio, las anisotropías de más de un grado corresponden al desplazamiento al rojo gravitatorio, producidas por masas engendradas al principio del Universo. Es como si viéramos las condiciones iniciales del universo. Y el mapa completo nos informa del desplazamiento al rojo cosmológico. Los tres tipos de desplazamiento al rojo: cosmológico, gravitatorio y Doppler, se ponen de manifiesto en esta imagen de Planck, que es realmente uno de los logros más singulares de la ciencia: es la imagen obtenida, hace muy poco, del Universo más primitivo que, hoy por hoy, podemos observar directamente.

Debido al desplazamiento al rojo, lo que vemos es un cartografiado y es a la vez la historia del Universo y la historia de su expansión. En el Cosmos, los conceptos de espacio, tiempo y velocidad de alejamiento se confunden. Lo muy lejano es lo más primitivo y lo que más rápidamente se aleja. Y lo extraordinario es que hoy “vemos” directamente al Universo recién nacido.

Espectaculares están siendo las imágenes del telescopio James Webb. Aquí también aprovechamos el efecto de enrojecimiento. Este telescopio observa en el infrarrojo para que nosotros estudiemos lo que habríamos visto en los tiempos en que se formaron las primeras estrellas y galaxias. Y espectaculares imágenes está obteniendo la misión GAIA, midiendo 2 mil millones de estrellas, esta vez sí, observando luz visible.

Pero además, no es que no podamos “ver” casi todas las radiaciones electromagnéticas, salvo las del rango visible, sino que la mayor parte de la materia del Universo es materia oscura, que ni se ve ni se puede ver, porque no interacciona directamente con la materia. Pero de lo que vemos, hemos de deducir lo que no vemos. Adjuntamos un mapa de la distribución de la materia oscura en el Universo obtenida por PLANCK. Además, la materia oscura no es más que una parte del mayor componente del Universo: la energía oscura que es ya hoy el componente mayoritario y lo que dominará el Universo del futuro. Ahora, el Universo se expande acelerándose. Cuanto mayor es el Universo, más se agranda, debido a esta misteriosa energía oscura. También hemos podido determinar su contribución actual a la composición del Universo. Todo esto ha sido posible, con mayor precisión que nunca, gracias a la misión espacial Planck de la Agencia Espacial Europea, en la que Andalucía ha contribuido de forma importante.

Hoy podemos ver a unas distancias del orden de casi 13.800 millones de años-luz, de lo que ocurría hace casi 13.800 millones de años, lo que ahora se aleja casi a la velocidad de la luz. Todo empezó cuando un homínido se preguntó ¿por qué brilla una estrella?







# **ABSORCIÓN DE LA LUZ POR EL AGUA. ZONAS LUMINOSA Y AFÓTICA DE LOS OCÉANOS**

JOSÉ CARLOS GARCÍA-GÓMEZ

*Catedrático de Zoología, Universidad de Sevilla*



ISABEL CÁRDENAS MARCIAL

*Investigadora Asociada, Departamento de Zoología, Universidad de Sevilla*

**UNA DÉCIMA PARTE, O MÁS, DE LA ENERGÍA** solar que incide sobre la superficie del océano en forma de ondas cortas –aquellas que son muy energéticas– es reflejada en longitudes de onda larga –menos energéticas– que rebotan lejos de la misma (Clarke & James, 1939). En contraposición, la luz que consigue atravesar la superficie oceánica es rápidamente absorbida. No obstante, el nivel de absorción dependerá de múltiples factores, destacando la turbidez o cantidad de partículas disueltas en la masa de agua, y es que, cuanto mayor sea el grado de turbidez, más rápido será el proceso de absorción de la luz. Por ejemplo, en aguas ligeramente transparentes, la luz que se introduce bajo la superficie se reduce a la mitad a partir de los 20-30 metros de profundidad (García-Gómez *et al.*, 1997), no siendo así en aguas más turbias. Asimismo, cabe destacar que el nivel de luz incidente no es un parámetro constante, sino que fluctúa a lo largo del día, según la estación y la latitud, y depende del grado de nubosidad y de los gases que componen la atmósfera, entre otros.

De forma general, en mares y océanos puede establecerse una notable estratificación relacionada directamente con la profundidad y, por tanto, con la pérdida gradual de la luz absorbida. Se distinguen, así, de mayor a menor nivel de luminosidad, tres zonas (ver Cognetti *et al.* [2001], Brown [2016] y García-Gómez [2022]):

1. *Zona fótica* (o eufótica, según la fuente). Es la capa más iluminada, comprendida entre la superficie del mar y la profundidad hasta donde llega la luz –desde escasos centímetros en aguas muy turbias, hasta 200 menos en aguas extremadamente transparentes.
2. *Zona disfótica* (también conocida como crepuscular o de penumbra). Es la capa subyacente a la zona fótica, donde la luz comienza a escasear. Se corresponde con un área de transición entre la zona más iluminada y la más completa oscuridad.
3. *Zona afótica*. Es la capa carente de luz; menos del 1% de la luz solar es capaz de penetrar en ella. Si los océanos tienen, aproximadamente, una profundidad media de unos 4.000 metros, se deduce que prácticamente el 99% de las masas oceánicas están inmersas en las tinieblas.

No obstante, los límites entre zonas no pueden generalizarse ya que, como se ha especificado con anterioridad, dependen fundamentalmente de la mayor o menor concentración de sólidos en suspensión presentes en el agua. Asimismo, cabe destacar que, en relación a la intensidad de luz de cada una de las capas, el proceso de fotosíntesis va a ser diferente, pasando de un desarrollo eficiente en la zona fótica –pese al ínfimo volumen que ésta representa respecto al total de la masa de agua–, a presentar un balance negativo en la zona disfótica, consumiéndose más oxígeno del que se produce. La profundidad a la que los procesos de producción y consumo de oxígeno se compensan, pasando de un balance positivo a un balance negativo, se conoce como profundidad de compensación, y tiene lugar al inicio de la capa disfótica. Por último, en la capa afótica no es posible el desarrollo de los procesos fotosintéticos por la prácticamente despreciable fracción de luz incidente.

También es necesario aclarar que los rayos de luz de distintas longitudes de onda no penetran del mismo modo en el ecosistema marino. Mientras que los rayos infrarrojos irradian sólo la superficie oceánica, no penetrando más allá, los ultravioletas tan solo llegan hasta unos 3 metros (pudiendo superar los 10 metros en determinadas

ocasiones), lo cual supone una ventaja, ya que resultan perjudiciales para múltiples organismos. Respecto a la absorción del espectro de luz visible, el agua absorbe principalmente las frecuencias más bajas, que son aquellas asociadas a las tonalidades correspondientes al color rojo y al naranja, mientras que los colores azules y verdes son transmitidos íntegramente. En especial, los rayos azules son los que tienen un mayor poder de penetración, pudiendo alcanzar incluso los 150 metros de profundidad, antes de ser reducidos a un 1%. Sin embargo, estas condiciones van a verse nuevamente influenciadas por el nivel de turbidez o de transparencia de las aguas (Thorson, 1971).

Por tanto, mientras que en el medio terrestre el color puede apreciarse en toda su extensión, en el mar, debido a la elevada densidad del agua con respecto a la del aire (Clarke, 1987) –con valores de 1,0280 g/cm<sup>3</sup> (a una salinidad del 35%) y 0,0013 g/cm<sup>3</sup> (dato recogido al nivel del mar), respectivamente–, la escala de colores del espectro visible es rigurosamente filtrada y, a partir de los 20-30 metros de profundidad, todo se tiñe de azul, aunque esta cifra vuelve a ser aproximada. En consecuencia, el significado ecológico del color en el mar debe estar basado en aquellos organismos que habitan áreas iluminadas.

La influencia de la luz en los organismos marinos es de una gran importancia, los cuales, en función del nicho que ocupan, se han adaptado a diferentes intensidades de luz y, por tanto, a determinados colores del espectro lumínico. En este sentido, las algas verdes, por ejemplo, suelen habitar en las capas más superficiales e iluminadas, donde es más eficaz la fotosíntesis, explotando de esta forma la energía de la parte roja y azul del espectro. En contraposición, las algas pardas y rojas pueden ser encontradas a una profundidad mayor, ya que emplean prioritariamente los rayos azules (Thorson, 1971).

Pero la luz no solo interfiere en los procesos fotosintéticos, sino que también es utilizada como señal para la orientación, como marcadores de los ciclos de reproducción, como motor en los procesos de alimentación y de migración, etc... aunque, en muchos casos, su efecto no es fácil de dilucidar.

Asimismo, es de vital importancia el papel de la luz como elemento determinante en la distribución vertical de los organismos marinos. Existe

un mayor volumen de individuos en las capas más superficiales, donde la luz favorece los procesos fotosintéticos y donde, por tanto, la obtención de comida es más cómoda. Pero conforme aumenta la profundidad, escasea el alimento disponible y, en consecuencia, la población disminuye. Es necesario destacar que hay especies que no permanecen estancas en un determinado nivel, sino que migran mediante desplazamientos verticales influenciados por los cambios periódicos de iluminación (Fincham, 1987). No obstante, pese a que el número de organismos es mayor en aquellos estratos más superficiales, existe una explosión de biodiversidad relacionada directamente con un aumento de la profundidad.

Los organismos marinos presentan diferentes adaptaciones relacionadas con las diversas condiciones lumínicas del entorno, que han ido adquiriendo a lo largo de la evolución, como las concernientes a la visión. En este sentido, hay especies que no ven o que solo perciben variaciones de intensidad de luz, especies que simplemente perciben variaciones de luz más o menos significativas, especies de visión monocromática (como muchos tiburones) y especies de visión dicromática a policromática, llegando a percibir una amplia gama de colores. También se ha explotado la transparencia en el medio pelágico –sobre todo en la zona fótica, aunque también en los primeros metros de la zona de penumbra– como técnica de camuflaje frente a depredadores potenciales en un entorno donde las posibilidades de refugio escasean. Así, Johnsen (2001) revela que, en la columna de agua, existen tres adaptaciones esenciales en las que el depredador supera la barrera de la transparencia: visión ultravioleta, visión polarizada y visualización en el ángulo adecuado.

La polarización de la luz no es una mera adaptación de los organismos no transparentes a unas condiciones lumínicas determinadas, sino una utilización eficiente de la misma con fines defensivos. La luz que se refleja en una superficie está parcialmente polarizada en el eje perpendicular al plano incidente. De esta forma, cuando, por ejemplo, la luz incide sobre las escamas de los peces plateados, se polariza, siendo detectados por los depredadores con una alta probabilidad. Sin embargo, la evolución de las escamas de algunos organismos ha permitido que la luz no se polarice y las ondas sean reflejadas en todas las direcciones. Así, consiguen confundirse con su entorno en el océano abierto (Jordan *et al.*,

2012). Otras especies, además, son capaces de manipular sofisticadamente el grado de polarización, así como de transformar el ángulo de la luz en función del ángulo de incidencia (Brady *et al.*, 2013).

Por último, estudios recientes revelan que hay organismos marinos capaces de detectar la parte de la fracción del espectro lumínico correspondiente a los rayos ultravioletas, ampliando de esta forma la importancia de aumentar el conocimiento sobre la sensibilidad ultravioleta en aquellos organismos de las capas más superficiales, como pueden ser los organismos planctónicos (MacDonald *et al.*, 2022).

## BIBLIOGRAFÍA

- BRADY, P., TRAVIS, K., MAGINNIS, T. & CUMMINGS, M. (2013). Polarized mirror of the lookdown as a biological model for open ocean camouflage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110** (24): 9764-9769.
- BROWN, W. (2016). Physical Properties of Seawater. In MANHAR DHANAK & NIKOLAS XIROS (eds.), *Springer Handbook of Ocean Engineering*. Berlín, Springer-Verlag.
- CLARKE, G. (1987). *Elementos de ecología*. Barcelona, Omega.
- CLARKE, G. & JAMES, H. (1939). Laboratory Analysis of the Selective Absorption of Light by Sea Water. *Journal of the Optical Society of America*, **29** (2): 43-55.
- COGNETTI, G., SARÀ, M. & MAGAZZU, G. (2001). *Biología Marina*. Barcelona, Ariel.
- FINCHAM, A. (1987). *Biología Marina Básica*. Barcelona, Omega.
- GARCÍA-GÓMEZ, J.C. (2022). *Biología Marina. Medio físico, Biodiversidad, Recursos y Conservación*. Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.
- GARCÍA-GÓMEZ, J.C., MANZANO, C. & OLAYA, L. (1997). Los océanos y el litoral andaluz como escenario. En *Naturaleza de Andalucía: El Mar (Volumen 2)*: 27-82. Sevilla, Giralda.
- JOHNSON, S. (2001). Hidden in Plain Sight: The ecology and physiology of organismal transparency. *Biological Bulletin*, **201** (3): 301-318.
- JORDAN, T., PARTRIDGE, J. & ROBERTS, N. (2012). Non-polarizing broadband multilayer reflectors in fish. *Nature Photonics*, **6** (11): 759-763.

- MCDONALD, M.S., PALECANDA, S., COHEN, J.H. & PORTER, M.L. (2022). Ultraviolet vision in larval *Neogonodactylus oerstedii*. *Journal of Experimental Biology*, **225** (3).
- THORSON, G. (1971). *La vida en el mar*. Madrid, Ediciones Guadarrama.



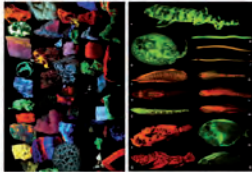
# BIO-LUCES MISTERIOSAS EN EL MAR. FLUORESCENCIA Y BIOLUMINISCENCIA

JOSÉ CARLOS GARCÍA-GÓMEZ  
*Catedrático de Zoología, Universidad de Sevilla*

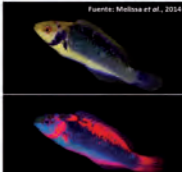


ISABEL CÁRDENAS MARCIAL  
*Investigadora Asociada, Departamento de Zoología, Universidad de Sevilla*

### 1. FLUORESCENCIA

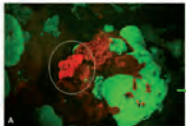


Fuente: Sparks et al., 2014

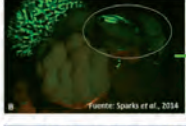


Fuente: Molino et al., 2014

Fluorescencia roja en peces para propósitos visuales (comunicación y defensa del territorio), pero no para protegerse de la radiación UV.



Fluorescencia roja del pez *Scorpaenopsis papuensis*, junto a fluorescencia roja de alga.

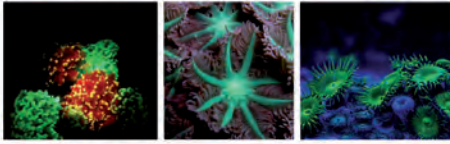


Fuente: Sparks et al., 2014

Fluorescencia verde-lima del pez *Scolopsis bilineata*, próximo a un coral del género *Acropora*, fluorescente del mismo color.

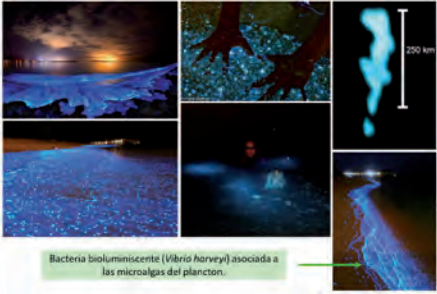
### 2. FLUORESCENCIA EN CORALES DE AGUAS SUPERFICIALES VS AGUAS PROFUNDAS

En los corales fluorescentes de aguas superficiales, los corales se protegen de la luz UV mediante proteínas fluorescentes, que la captan y la rebotan en longitud de onda más larga dentro del espectro de luz visible (verde/lima).




En el caso de los corales marinos de aguas profundas, las proteínas fluorescentes son rojas, capturan la luz azul y la convierten en una luz naranja-roja que tiene el potencial de penetrar profundamente en el tejido coralino y ser utilizable para la fotosíntesis de las zooxantelas que solo con tenue luz azul no podrían efectuarla.

### 3. BIOLUMINISCENCIA



Bacteria bioluminiscente (*Vibrio harveyi*) asociada a las microalgas del plancton.

### 4. EL COLOR DONDE NO SE VE



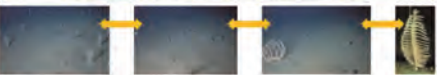
Animales rojos a los que se acerca un predador bioluminiscente con luz azul: ¿Qué sucederá?

Imagen sin tratar

Imagen tratada, sin luz roja

Imagen tratada, sin luz roja ni verde (solo azul)

### 5. TENDENCIA AL BLANCO EN LAS GRANDES PROFUNDIDADES





# **BIO-LUCES MISTERIOSAS EN EL MAR. FLUORESCENCIA Y BIOLUMINISCENCIA**

JOSÉ CARLOS GARCÍA-GÓMEZ  
*Catedrático de Zoología, Universidad de Sevilla*



ISABEL CÁRDENAS MARCIAL  
*Investigadora Asociada, Departamento de Zoología, Universidad de Sevilla*

**LOS COLORES RAROS DE BRILLO ESPECIAL**, misteriosos y fascinantes que el ojo humano puede ver en la superficie del mar o bajo ella (incluso en las grandes profundidades) provienen de organismos fluorescentes o bioluminiscentes.

En la fluorescencia biológica, ciertas moléculas de una sustancia orgánica pueden emitir luz fría de menor energía (longitud de onda larga) tras su excitación por otra luz externa, de mayor energía (longitud de onda corta). La diferencia entre fluorescencia y fosforescencia estriba en que, en la primera, la luz se refleja en nanosegundos y, en la segunda, se retiene, almacena y se libera con posterioridad (recuérdense los interruptores de luz de habitaciones o los relojes fosforescentes que se ven en la oscuridad).

En la bioluminiscencia, la luz proviene de una reacción química, que se da en seres vivos capaces de producirla, por ejemplo, entre una enzima y su sustrato específico.

Los colores fluorescentes los vemos porque la luz que los produce se refleja en luz menos energética (mayor longitud de onda) del espectro visible, pero son distintos: bellísimos, elegantes, con un aura de misterio que no les permite diferenciarlos de sus homólogos convencionales: solo hay que observar rojos, verdes o violetas normales y sus variantes fluorescentes. La cuestión es porqué se da este fenómeno en las especies marinas.

Vamos a señalar unos ejemplos del sentido que tiene, en términos evolutivos, los colores que vemos. A veces los colores no tienen explicación adaptativa (o no se le ha descubierto). Se les considera neutrales, por tanto, a efectos de la selección natural. Pero si se les descubre una utilidad, tienen sentido evolutivo y, sabiéndolo interpretar, podríamos en muchos casos deducir para qué pueden servirles o, en definitiva, qué utilidad pueden reportarles a los organismos que los exhiben.

Aunque la luz ultravioleta (UV, invisible, de corta longitud de onda) la pueden aprovechar ciertas especies de peces para ver sus reflejos (en el espectro visible) y reconocerse intraespecíficamente, otros peces pueden localizar presas crípticas del plancton totalmente translúcidas, las cuales reflejan parcialmente la luz ultravioleta que incide sobre ellas, deviniendo visibles para aquellos (las presas las perciben casi negras en un entorno azulado, muy claro). También, hay especies de peces que emiten fluorescencia para defensa del territorio y comunicación (Meadows *et al.*, 2014), y otros que lo hacen para enmascararse con corales que emiten fluorescencia de similar color (Sparks *et al.*, 2014).

Por otra parte, la luz UV protagoniza llamativos casos de fluorescencia en los corales y otras especies de invertebrados marinos por diferentes motivos adaptativos. Así, los corales que viven en aguas someras, muy iluminadas y de ámbito de penetración de la luz UV, han desarrollado proteínas específicas de protección contra esta radiación perniciosa, neutralizándola al absorber una parte de la misma y reflejando otra fracción de longitud de onda larga (visible, menos energética y dañina), la cual puede ser amarillenta, verde o roja, pero de brillo y tonos muy especiales. Son colores fluorescentes, subproducto de una adaptación previa a la protección de la luz UV.

La fluorescencia de los corales, como la de otros organismos que también pueden producirla, se utiliza para detectar su nivel de estrés en el ámbito marino, por lo que constituye una buena herramienta para monitorizarlos y controlar su respuesta a determinados impactos ambientales que puedan acontecer no solo a nivel local, sino también a escala general que, lentamente, se van produciendo en el tiempo (por ejemplo, como consecuencia del progresivo aumento de temperaturas derivado del calentamiento global). Cuanto menos fluorescentes se

muestren los corales con el tiempo, más estresados y/o enfermos estarán. Al respecto, se ha observado que infecciones que provocan enfermedades en estos invertebrados coloniales, antes de ser detectadas por alguna otra señal, lo van a ser por la progresiva disminución de la fluorescencia que emiten.

Por otro lado, los corales de profundidad son un ejemplo extraordinario de cómo pueden utilizar la luz, adaptativamente, en un mundo teñido de azul (por haberse retenido previamente en las aguas más superficiales el resto de rayos del espectro lumínico, de mayor longitud de onda), ya que sus algas simbiotas (zooxantelas, que también coexisten con los corales de aguas superficiales) necesitan luz azul y roja para realizar fotosíntesis en un ambiente donde la luz roja no llega y hay que “biofabricarla”. Para ello, la evolución ha dotado a estos corales de unas proteínas específicas que reflejan parte de la luz incidente en otra menos energética (mayor longitud de onda), de color rojo fluorescente (Eyal *et al.*, 2015).

La bioluminiscencia es luz producida por organismos vivos, consecuencia de una reacción química en la que una proteína especializada, la luciferina (capaz de almacenar mucha energía), sufre una oxidación por una enzima catalizadora (luciferasa), la cual libera aquella produciéndose luz. La bioluminiscencia se ha explotado satisfactoriamente por dinámica evolutiva tanto en organismos unicelulares como en pluricelulares. Entre los primeros llaman la atención las extensas concentraciones de bacterias bioluminiscentes (*Vibrio harveyi*), asociadas a las microalgas del plancton, las cuales protagonizan los llamados mares de Ardora, visibles desde el espacio (Simón, 2017).

Pero especialmente fascinante es la bioluminiscencia que se observa en las zonas disfótica y afótica, es decir, en aquellas donde apenas llegan trazas de luz desde la superficie o esta deviene completamente ausente (aguas muy profundas), donde no se detecta ni tan siquiera el 1% de la luz azul que es refractada en la superficie del mar. En este mundo de tinieblas absolutas, la bioluminiscencia –intrínsecamente adaptativa– es utilizada para funciones muy diversas, entre las que podemos destacar (ver García-Gómez, 2022):

1. Localización e identificación de peces conspecíficos (algo parecido a los mensajes lumínicos de un reflector de señales en navegación). Lo consiguen amplificando el poder de iluminación mediante placas de guanina, a modo de materiales reflectantes. Son casos de bioluminiscencia intracelular, que también se da en muchas especies de calamares y dinoflagelados.
2. Capturar presas. Peces con prolongación cefálica bioluminiscente en su extremo, a modo de caña de pescar, para capturar las presas atraídas por el extremo distal iluminado, voluntariamente agitado dada su flexibilidad.
3. Evitar ser cazado mediante la producción de nubes luminosas (bioluminiscencia extracelular). Muchos crustáceos y cefalópodos de profundidad. Sería un mecanismo similar, en cuanto a función, a las nubes de tinta que liberan pulpos y sepias para ocultarse mientras escapan de potenciales amenazas.
4. Funciones variadas mediante simbiosis con bacterias luminiscentes alojadas en estructuras especializadas (fotóforos). Es la tipología de bioluminiscencia más extendida en el Reino Animal y se da en especies de cnidarios, anélidos, moluscos, equinodermos y peces.

Fleiss & Sarkisyan (2019) señalan que el significado ecológico de la bioluminiscencia es controvertido, si bien Young (1983) sostiene que está fundamentalmente relacionada con la depredación y con evitar ser comido.

¿Cómo se interpreta el mundo de los colores convencionales en las grandes profundidades y su posible relación con la bioluminiscencia? Hay ejemplos que realmente impresionan y dan qué pensar. Es el caso de numerosas especies de diferentes tipos de organización que, cuando son fotografiadas en aguas abisales con luz blanca de un batiscafo ... ¡son rojas!, ¿cómo se explica este color allá donde físicamente todos los del espectro lumínico no pueden percibirse? Podría argüirse que ese color es neutral a efectos de la selección natural, como el color rojo de

la sangre, que no es adaptativo sino la consecuencia de la estructura y configuración espacial de la molécula de hemoglobina que, al ser iluminada con luz blanca, refleja solo la parte roja del espectro. Pero no es el caso y, además, esa frecuente presencia del rojo en las profundidades se da en especies de grupos filéticos distintos, por lo que no ha de ser neutral a efectos evolutivos, sino adaptativo. La razón de ello parece estar en la bioluminiscencia de sus depredadores, que utilizan su caña de pescar iluminada, emisora de luz azul fría en su extremo, la cual, al incidir sobre el cuerpo rojo de una presa potencial, no es visible (por reflejar la luz azul en un tono casi negro) al encriptarse con el paisaje imperante, totalmente oscuro.

¿Cuál sería el siguiente paso evolutivo en los depredadores una vez hubiere mucha presa roja en las profundidades? Cambiar la bioluminiscencia azul por la roja. Si ante una iluminación con luz blanca, una superficie biológica refleja exclusivamente el rojo, si es solo iluminada con este color será íntegramente reflejada observándose roja. Es lo que acontece en algunas especies de peces que, cuando “alumbran” a sus presas con luz roja bioluminiscente, las descubren sin problema al reflejar éstas tal color.

¿Colapsa el recorrido evolutivo en el ejemplo recién expuesto? No, pero esta vez le toca evolucionar a las presas rojas. Lo hacen de otro modo, utilizando también la bioluminiscencia, pero la extracelular, desarrollando la capacidad de producir nubes luminosas que, como la tinta del calamar, usan para huir, ocultarse o desconcertar a los potenciales depredadores.

Finalmente, en los fondos más profundos es frecuente el blanco. Este no suele provenir de pigmentos (cuestan energía producirlos y mantenerlos), sino de estructuras quitinosas o calcáreas que reflejan el blanco de la iluminación con luz blanca. La presión selectiva en estos entornos de oscuridad extrema conduce a la despigmentación, a la pérdida de la coloración y a la tendencia, pues, a que se vean muchas especies de color blanco. Ello se observa, además, en la fauna asociada a fuentes hidrotermales profundas, exquisitos enclaves de biodiversidad muy especializada, y también en la fauna cavernícola de zonas muy internas de grutas terrestres.

## BIBLIOGRAFÍA

- EYAL, G., WIEDENMANN, J., GRINBLAT, M., D'ANGELO, C., KRAMARSKY-WINTER, E., TREIBITZ, T., BEN-ZVI, O., SHAKED, Y., SMITH, T., HARI, S., DENIS, V., NOYES, T., TAMIR, R. & LOYA, Y. (2015). Spectral Diversity and Regulation of Coral Fluorescence in a Mesophotic Reef Habitat in the Red Sea. *PLoS ONE*, **10** (6), e0128697.
- FLEISS, AUBIN & SARKISYAN, KAREN (2019). A brief review of bioluminescent systems. *Current Genetics*, **65** (4): 877-882.
- GARCÍA-GÓMEZ, J.C. (2022). *Biología Marina. Medio físico, Biodiversidad, Recursos y Conservación*. Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla.
- MEADOWS, M., ANTHES, N., DANGELMAYER, S., ALWANY, M., GERLACH, T., SCHULTE, G., SPRENGER, D., THEOBALD, J. & MICHIELS, N. (2014). Red fluorescence increases with depth in reef fishes, supporting a visual function, not UV protection. *Proceedings of the Royal Society B*, **281**, 20141211.
- SIMÓN, B.V. (2017). Éssers que il·luminen: la bioluminescència. *Atzavara, L'*, **27**: 55-63.
- SPARKS, JOHN, SCHELLY, ROBERT, SMITH, LEO, DAVIS, MATTHEW, TCHERNOV, DAN, PIERIBONE, VINCENT & GRUBER, DAVID (2014). The Covert World of Fish Biofluorescence: A Phylogenetically Widespread and Phenotypically Variable Phenomenon. *PLoS ONE*, **9** (1), e83259.
- YOUNG, R.E. (1983). Oceanic bioluminescence: An overview of general functions. *Bulletin of Marine Science*, **33** (4): 829-845.



# LA LUZ COMO FUENTE DE ENERGÍA. ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA

ANTONIO GÓMEZ EXPÓSITO  
*Real Academia Sevillana de Ciencias*



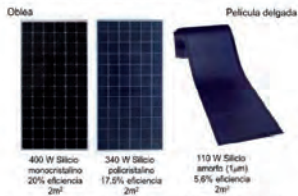
Primera instalación fotovoltaica en una cubierta de Nueva York (1884), realizada por C. Fritts [Fuente: J. Perlin, *Let it shine: the 6,000-year story of solar energy*, New World Library, 2013]



Satélite Explorer 6, con cuatro paneles PV compuestos por casi 10.000 células. [Fuente: <https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite>]



Primera planta PV de 1 MW de potencia, en California (1982), con seguimiento a dos ejes y lentes Fresnel [Fuente: Sunpower]



Tecnologías de fabricación de paneles solares de silicio: monocristalino, policristalino y película delgada



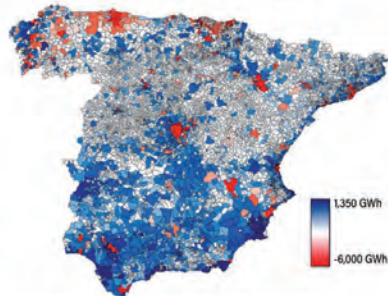
Vista aérea de plantas PV instaladas sobre suelo entre Carmona y Sevilla



Instalación PV sobre tejado en una vivienda unifamiliar del Aljarafe sevillano



Instalación PV sobre cubiertas de bloques de pisos en la provincia de Málaga [Fuente: <https://www.enarsolul.com/instalaciones/>]



Balance neto anual entre el potencial de generación PV sobre tejado y el consumo eléctrico actual a nivel municipal (en rojo los municipios deficitarios y en azul los excedentarios) [Fuente: <https://www.sistemaeficiencia.com/sistema/eficiencia/2013/04/01/213649321203036558>]



# LA LUZ COMO FUENTE DE ENERGÍA. ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA

ANTONIO GÓMEZ EXPÓSITO  
*Real Academia Sevillana de Ciencias*

**EL EFECTO FOTOVOLTAICO (FV) EN UN MEDIO** líquido fue descubierto en 1839 por el francés A.E. Becquerel. En 1877, el británico W. Smith observó el mismo fenómeno en un medio sólido (unión de platino con selenio). Seis años más tarde, el americano C.E. Fritts publicó sus investigaciones con la primera célula solar de película delgada de la historia, compuesta por una fina capa de selenio entre dos láminas metálicas. Fue además el primero en construir una instalación FV completa sobre un tejado neoyorquino, con la que consiguió una eficiencia cercana al 1% (muy lejos de las cifras actuales).

Habría que esperar hasta los años 50 del siglo XX para lograr el siguiente avance relevante en tecnología FV, al calor de los incipientes desarrollos en dispositivos semiconductores de estado sólido (diodo y transistor). En 1954, un equipo de los laboratorios Bell dirigido por W. Shockley logró producir electricidad FV con un diodo de silicio, construido de tal modo que su unión  $p-n$  quedase expuesta a la radiación solar. Como es bien sabido, un diodo convencional no permite el paso de corriente inversa (es decir, circulación interna de electrones desde el terminal  $p$  al  $n$ ), debido a la barrera que impone el *potencial de la unión*<sup>1</sup>. Pero los fotones que inciden en la unión  $p-n$  aumentan proporcionalmente la cantidad de electrones que pasan de la banda de valencia a la de conducción. La gran mayoría de estos electrones libres provoca una corriente inversa en el diodo capaz de circular por un circuito exterior.

---

1 Gradiente de potencial eléctrico que se forma en una estrecha franja (zona de difusión) donde se recombinan electrones y huecos.

En 1958, el satélite artificial norteamericano Vanguard I empleó por primera vez esta tecnología como fuente de energía. A diferencia de los satélites anteriores, alimentados exclusivamente por baterías que duraron escasas semanas, este pequeño satélite, todavía hoy en órbita, estuvo operativo durante seis años. El éxito fue de tal calibre que los paneles FV se convirtieron inmediatamente en la opción preferida para electrificar consumos en zonas remotas (boyas de navegación marítima, repetidores de TV, protección catódica de oleoductos, etc.), frente a los antiguos grupos electrógenos.



**Boya marítima operada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos [Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NOAA-NDBC-discus-buoy.jpg>]**

Entre los años 70 y 80 del siglo XX se llevaron a cabo varios despliegues de instalaciones FV en países sin una infraestructura adecuada (República Dominicana, Vietnam, India, Kenia, etc.), orientados generalmente a proveer de electricidad a pequeñas aldeas para servicios básicos (bombas de agua, iluminación, frigoríficos, etc.).

Más allá de las testimoniales instalaciones en zonas rurales aisladas, la primera oportunidad real para la energía solar, en particular la FV, se produjo en los años 70, con las sucesivas crisis del petróleo que

golpearon el sistema económico con altas tasas de inflación (el precio de la gasolina se multiplicó por cuatro en países como EE.UU.). Esta difícil coyuntura contribuyó al masivo despliegue de las centrales nucleares, y trajo consigo sistemas de generación térmica más eficientes, como las centrales de gas de ciclo combinado, pero también reactivó el interés por las energías renovables, incluyendo la solar. La primera planta FV que superó 1 MW de potencia se instaló en California (1982), consiguiendo el 27% de eficiencia con seguimiento a dos ejes y lentes Fresnel. Poco después (1984), la misma empresa (Arco Solar) construyó una planta de 5,4 MW, homologable a las actuales. Por tanto, la industria FV, al menos para aplicaciones terrestres, tiene sólo unos 40 años de vida, aunque su origen sea muy anterior (140 años).

Alemania puso en marcha en 1989 el programa conocido como “1.000 tejados”, seguido en 1999 por el más ambicioso “100.000 tejados”, dotado con generosas primas a la producción FV<sup>2</sup>. Varios años más tarde (2007-2008), tanto Alemania como España destacaron en el panorama internacional por el importante apoyo económico al despliegue masivo de plantas FV, aunque con notables diferencias entre ambos modelos, a favor del *Energiewende* alemán.



**Vivienda unifamiliar en Bayern, con 5 kWp de paneles FV del programa alemán “100,000 tejados” [Fuente: <https://live.pege.org/2001-pilsting/pflegau-41.htm>]**

2 <https://www.iea.org/policies/3476-100-000-roofs-solar-power-programme>

En 2008, con unas 60 plantas de más de 10 MW, España se convirtió fugazmente en líder de este tipo de instalaciones sobre suelo, mientras que en Alemania la regulación favoreció las plantas más pequeñas sobre tejados. Sin embargo, esto fue un espejismo, y tras un insoportable déficit en el balance del sector eléctrico, ocasionado por un deficiente diseño de primas, España apenas instaló más FV durante la siguiente década (2009-2018).

Con aproximadamente una década de retraso, la energía FV ha seguido la misma senda de crecimiento exponencial que previamente vivió la eólica. A nivel mundial, la contribución de la FV se ha multiplicado por más de 20 entre 2010 y 2020 (pasando del 0,15% al 3,2% de la producción eléctrica), en paralelo a una reducción de costes de más del 90%. En 2021, la potencia FV global acumulada superó a la eólica, alcanzándose la simbólica cifra de 1 TW pico en 2022. A las tasas de crecimiento actuales, la potencia FV instalada se duplicará aproximadamente cada tres años, y superará a la hidráulica antes de 2025. En España, la potencia FV instalada ha pasado de unos 5 GW en 2018 a más de 25 GW en 2022. Antes de 2030 será la principal fuente de electricidad en nuestro país.



**Vista aérea de plantas FV instaladas sobre suelo agrícola entre Carmona y Sevilla**

El carácter modular de la energía FV la hace idónea para instalaciones de cualquier tamaño, desde plantas más potentes que una central nuclear (que superan en algunos casos los 1.500 MW) hasta instalaciones domésticas desde un kilovatio para autoconsumo. Lógicamente, las grandes plantas sobre suelo tienen menor coste que las instalaciones distribuidas sobre tejado, pero adolecen de otros inconvenientes, como la necesidad de encontrar una ubicación adecuada, que supere la preceptiva declaración de impacto ambiental y que esté lo más cerca posible de un punto de evacuación eléctrica, lo cual resulta cada vez más complicado. Hay países, como Alemania o Australia, donde la FV distribuida sobre cubiertas representa hasta el 80% del total instalado, mientras que en otros ocurre justo lo contrario. Sólo en 2022, España prácticamente ha duplicado la potencia FV instalada sobre cubiertas, alcanzando la nada desdeñable cifra de 5 GW, frente a los 20 GW sobre suelo, pero el potencial FV de los tejados en la península ibérica está aún muy lejos de agotarse. Según un estudio del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), el potencial teórico supera los 170 GW, aunque trabajos más recientes<sup>3</sup> estiman un potencial que excede los 200 GW. Por tanto, frente a las previsiones iniciales del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, que estimaba una potencia FV instalada de 39 GW en 2030, las tendencias actuales sugieren que dicha cifra podría doblarse, hasta superar los 75 GW, de los que un 35-40% podría ser sobre cubierta.

En el aspecto tecnológico, se esperan todavía notables mejoras de rendimiento y reducción de costes en células FV, con la introducción de nuevos materiales y tecnologías de fabricación. Actualmente, la tecnología FV más cercana a su despliegue masivo es la basada en células bifaciales, construidas de forma que sean fotosensibles por ambas caras, lo cual les permite aprovechar el efecto albedo y cualquier radiación indirecta que pueda llegar a la cara posterior del panel FV. En condiciones óptimas, las células bifaciales pueden suministrar hasta un 25-30% más de electricidad que las convencionales, a igualdad

---

3 S. Joshi *et al.*, “High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation”, *Nat. Commun.* 12, 5738 (2021).

de superficie y a un coste solo ligeramente superior. Hacia 2030, se prevé que más del 50% de instalaciones FV sobre suelo utilicen células bifaciales.

Otra tecnología que está avanzando rápidamente, aunque todavía no se aplica en instalaciones terrestres, es la de células FV multiunión. Consisten en el solapamiento de varias uniones, generalmente de elementos trivalentes y tetravalentes (galio, indio, arsénio, etc.), de modo que cada unión aproveche al máximo una determinada banda del espectro electromagnético, consiguiéndose así eficiencias teóricas de hasta el 70% (el doble que las células convencionales). Aparte de su elevado coste, las células multiunión actuales adolecen de usar componentes tóxicos y poco comunes en la corteza terrestre.


Por último, no podemos olvidar la extensa y diversa familia de *perovskitas*, que algunos consideran como la próxima revolución en células FV. La perovskita es un mineral natural (titanato de calcio) encontrado por primera vez en los Urales en el siglo XIX, con una estructura cristalina compleja que depende de la temperatura. Por extensión, se denominan también perovskitas a ciertos compuestos sintéticos, generalmente mixtos (orgánicos e inorgánicos), que cristalizan en estructuras similares a la perovskita natural. Estos compuestos pueden ser depositados en finas capas, lo que los hace muy atractivos para la fabricación barata de paneles FV de película delgada, que podrían colocarse sobre cualquier superficie, no solo sobre tejados. En la actualidad, las perovskitas están siendo objeto de numerosos estudios, orientados a eliminar sus principales inconvenientes, entre otros: 1) dificultad de fabricación a gran escala; 2) degradación con la humedad; 3) toxicidad de algunos componentes (v.g. plomo).




# RAYOS X. UNA RADIACIÓN MISTERIOSA

F. JAVIER FERNÁNDEZ MENA

*Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental*

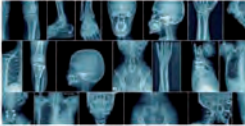


**Exposición y Dosimetría**  
Riesgos de la exposición a Rayos X y medida de la dosis máxima permitida




**ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**


Longitud de onda: 1 km (ondas radio) a 0.0001 nm (rayos gamma)  
Energía: 1.6 x 10<sup>-19</sup> J (ondas radio) a 1.6 x 10<sup>-11</sup> J (rayos gamma)




**Aplicaciones en Medicina**  
Imágenes de radiología convencional por Rayos X



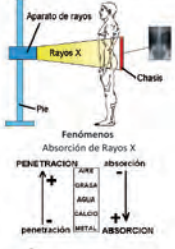
**Seguridad**  
Analizando personas, enseres y mercancías



**El Descubrimiento**  
Wilhelm Konrad Röntgen,  
Premio Nobel de Física 1901




**Tubo de Rayos X de Hittorf-Crookes**




**Fenómenos**  
Absorción de Rayos X


Penetración: PAPIRO, MADERA, AGUA, METAL  
Absorción: PLOMO



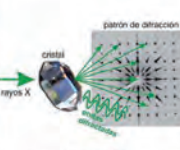
**Arte y Arqueología**  
Lo escondido, revelado



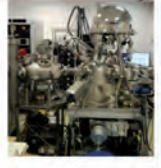
**Aparatos portátiles de Rayos X**




**Laser RX**  
De arma destructiva a análisis de la materia



**Cristalografía**  
Análisis de cristales y cuerpos cristalinos



**Microscopía y Espectroscopia RX**  
Análisis de sólidos, células y moléculas



**Astronomía y Astrofísica**  
Observando el Universo a través de los Rayos X



# RAYOS X. UNA RADIACIÓN MISTERIOSA

E. JAVIER FERNÁNDEZ MENA

*Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental*

**EXPERIMENTANDO CON UN TUBO DE** Hittorf-Crookes para observar la fluorescencia violácea que producían los rayos catódicos, Wilhem Konrad Röntgen observó el resplandor amarillo-verdoso proveniente de una pantalla de platinocianuro de bario y determinó la producción de una radiación penetrante a la que llamó “X” (8 de Noviembre de 1895). Diez días después, el Prof. Röntgen presentó su descubrimiento a la Sociedad Físico-Médica de Würzburg y en 1901 se le concedió el Premio Nobel de Física.

## NATURALEZA DE LOS RAYOS X

Es una radiación electromagnética o corpuscular de tipo ionizante con longitudes de onda entre 0,01 a 5Å. Su naturaleza es similar a las de ondas de radio, microondas, rayos infrarrojos, luz visible, ultravioleta y gamma. Los rayos X son de origen atómico extranuclear y se originan en los orbitales electrónicos al ser alcanzados por electrones de alta energía. La energía electromagnética de una partícula con longitud de onda determinada en el vacío tiene asociada una frecuencia ( $\nu$ ) y una energía del fotón (E) relacionada con la frecuencia por la ecuación

$$E=h.\nu$$

en la que h es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  Julios.segundo).

## FENÓMENOS

El principal fenómeno en rayos X es la absorción, con tres supuestos posibles:

- a. la radiación atraviesa el medio sin producirse ninguna modificación cualitativa o cuantitativa del haz.
- b. parte de la radiación atraviesa el medio y cede parte de su energía.
- c. la radiación es totalmente absorbida por el medio.

Otras formas de pérdida de energía del fotón incidente son las de efecto fotoeléctrico, efecto Compton y formación de pares que representan fenómenos de emisión. Los rayos X se absorben fácilmente por los huesos, que contienen calcio y atraviesan con mucha más facilidad materiales menos densos constituidos por C, H, O y N como los tejidos biológicos u orgánicos.

## APLICACIONES MÉDICAS

En el estudio de las lesiones y enfermedades internas a través de estudios radiográficos convencionales o digitalizados sin o con medios de contraste baritados (endocavitarios) o yodados (intravenosos), así como los del sistema cardio-vascular, en estudios de la patología de la mama, del sistema músculo-esquelético, cráneo y cara. En tomografía computarizada (TC) 3D en patología cervico-torácica y abdomino-pélvica, estudios angiográficos TC cerebrales, cardio-TC, angiografía toraco-abdominal y periférica, reconstrucciones virtuales 3D en patología del colon, diagnóstico oncológico y radiología intervencionista, así como en imagen híbrida en estudios de Tomografía de Emisión de Positrones (TEP).

## LOS RAYOS X EN CONFLICTOS BÉLICOS

Maria Curie inventó los aparatos de rayos X portátiles, para asistir a los soldados en campaña en la I Guerra Mundial (1914). Los rayos X

sobre ruedas examinaron a 1,2 millones de heridos y realizaron más de 900.000 estudios rutinarios en las famosas “Curies” o unidades de radiología móvil y sirviendo de diagnóstico fiable y guía a los cirujanos de campaña. Las unidades móviles tenían una sala de revelado de radiografías y una dínamo para generar la electricidad necesaria a partir del motor de gasolina. Cuando Maria Curie diseñó estas unidades de rayos X era Jefa de Servicio de Radiología de la Cruz Roja Francesa. Acudía a instalar los equipos y tuvo que aprender a conducir a la edad de 50 años, cambiar ruedas y tomar lecciones de mecánica básica, aprender a utilizar los aparatos y estudiar anatomía.

### **LOS RAYOS X EN LA INDUSTRIA Y ALIMENTACIÓN**

Los ensayos no destructivos mediante aplicación de rayos X en la industria han evolucionado mucho en los últimos años. Se utilizan para identificar discontinuidades internas o externas de componentes industriales o si se encuentran en condiciones idóneas para su uso y funcionamiento. Identifica también el tipo de material, su espesor, estado de soldaduras en conducciones y materiales de construcción. La técnica consiste en atravesar el componente con haces de radiación X, bien emitidos por generadores de rayos X o por aceleradores lineales (Sincrotrón) y la base son los haces que emergen del objeto y las variaciones en función de la consistencia interna del mismo. En la industria alimentaria en irradiación de alimentos en un proceso similar a la pasteurización y en determinar contenido de sal y agua, nivel de grasa y su distribución.

### **LOS RAYOS X EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA**

La atmósfera terrestre absorbe la mayoría de los rayos X del espacio y los telescopios convencionales no pueden detectarlos. Se precisa un telescopio espacial que ofrece imágenes de luz X remanentes de supernovas, analiza nebulosas, localiza emisiones de rayos X en agujeros negros y estudia la emisión de rayos X de objetos celestes. El AXAF (Advanced X-Ray Astronomical Facility) puede observar el cielo

en rayos X con una resolución angular de 0,5 segundos de arco, 1000 veces más que el primer telescopio de rayos X. Sus imágenes analizan el brillo de radiación X de Sagitario, de Júpiter, o los anillos de luz “X” en una estrella de neutrones. La emisión de rayos X se cree procede de fuentes que contienen gas muy caliente y sus átomos y electrones poseen una gran energía.

### **ESPECTROSCOPÍA Y MICROSCOPIA POR RAYOS X**

La microscopía RX utiliza rayos X de baja energía para generar imágenes ampliadas de un objeto. A diferencia de los electrones Auger de baja energía los rayos X proporcionan información analítica de un volumen considerable de la muestra. Puede resolver la estructura de células y sus componentes celulares como proteínas, macromoléculas y ADN. Puede combinarse con microscopía óptica y tiene una gran sensibilidad para detectar pequeñas cantidades de iones metálicos en el interior de las células y se convierte en una herramienta especial en el estudio de las enfermedades metabólicas. La Espectroscopía de rayos X utiliza un haz de electrones de alta energía para excitar los electrones centrales creando vacíos electrónicos y se usa para determinar la estructura electrónica de los materiales a partir de un análisis cualitativo general y semicuantitativo de los elementos con número atómico superior a 5 y cuantitativo de los más pesados.

### **CRISTALOGRAFÍA POR RAYOS X**

Es una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales basada en el fenómeno de difracción de rayos X por sólidos en estado cristalino debido a la simetría de agrupación de los átomos. Consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia a estudio. El haz se escinde en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de los átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal aplicando la Ley de Bragg para producir un mapa de densidad electrónica. La posición e intensidad de cada punto, la resolución de las

fases de las ondas que formaron cada punto. Se utilizan rayos duros con una longitud de onda de  $1\text{\AA}$  y energía de  $12.4\text{ KeV}$ .

### **LASER DE RAYOS X**

Comenzó como una idea para un programa militar en 1980. Actualmente el Laser de rayos X es un programa civil que sirve para estudiar proteínas, reacciones químicas y estados exóticos de la materia. El primer láser para investigación civil se desarrolló en la Universidad de Stanford y funciona como fuente de luz coherente proveniente de un acelerador lineal. Los haces de rayos X se caracterizan por su elevada pureza e intensidad. Al incidir sobre átomos, moléculas y sólidos puede crear estados exóticos de la materia, imposibles de reproducir por otros medios. La brevedad de sus impulsos permite utilizarlo para captar imágenes de alta velocidad de proteínas y virus. En el estudio de sólidos los transforma en una fase ionizada o plasma.

### **LOS RAYOS X EN ARTE Y ARQUEOLOGIA**

Las obras de arte guardan muchos secretos e ignoramos las vicisitudes del artista y cómo afectaron a su composición. Los rayos X pueden detectar tales secretos y ofrecer una visión nueva y misteriosa de nuestras obras preferidas. En 1986 el Museo del Prado ofreció una selección de obras de arte con información aportada por rayos X. Su instalación entró en funcionamiento en 1975 y es célebre por sus métodos científicos, técnica radiográfica depurada, interpretación de los resultados y extracción de conclusiones. La radiografía revela lo que el ojo no ve y muestra el interior de las obras, sus soportes, modificaciones pictóricas, estado de conservación de las piezas y procedimientos empleados en su realización. Otra aplicación de los rayos X es el estudio de cuerpos momificados, una cirugía sin bisturí, su reconstrucción 3D facial y corporal, el estudio de lesiones internas o deformaciones y de cualquier objeto a estudio (arcillas, papiros, documentos antiguos, recipientes, amuletos y otros materiales).

## RAYOS X Y SEGURIDAD

Los rayos X en los aeropuertos detectan las diferentes densidades de los elementos que hay dentro de un contenedor (maletas, carteras) y su funcionamiento es similar a los detectores de personas pero presentan mayor sensibilidad y discriminación de densidades y definición de formas a través de un software que colorea una y otra. Tienen una amplia profundidad de campo y perciben todo el volumen con reconocimiento geométrico. Emiten un haz estrecho de rayos X de muy baja intensidad con escáneres de retrodispersión o reflexión del haz de rayos X en el mismo ángulo en que fue emitido. La aplicación de rayos X en aeropuertos, prisiones, estaciones de ferrocarril, Metro, tribunales y aduanas se usa para detectar diferentes densidades de los elementos que hay dentro de una maleta, carteras, vestimenta de personas, análisis de mercancías, detección de explosivos, bombas y drogas a través de instalaciones muy sofisticadas.

## EXPOSICIÓN Y DOSIMETRÍA

Las dosis bajas de rayos X dañan más el ADN que las dosis altas. Se producen roturas de la doble cadena de ADN y esto se relaciona con el cáncer y enfermedades hereditarias. Los efectos de la radiación pueden ser probabilísticos y no probabilísticos. La superación de un umbral de dosis implica con certeza algún tipo de consecuencias como el eritema de piel o las cataratas inducidas por radiación. La Dosimetría Rx se emplea para medir la exposición a la radiación ionizante, bien en forma personal bien como exposición a la radiación de un lugar concreto.



# LA RADIACIÓN GAMMA. LA LUZ MÁS PENETRANTE

YOLANDA MORILLA GARCÍA  
*Centro Nacional de Aceleradores, Junta de Andalucía, CSIC,  
Universidad de Sevilla*

**La atmósfera, un "escudo protector"**

La ionosfera absorbe los Rayos Gamma, los Rayos X y parte de los ultravioletas más energéticos.





**Elementos radiactivos naturales**

Las rocas ígneas son una fuente natural de radiación gamma.



## RADIACIÓN GAMMA

La luz más penetrante  
Un riesgo para la vida



**Control de plagas**

**Esterilización**

**Mejora genética**

**APLICACIONES**

**Ensayos aeroespaciales**

**Preservación alimentaria**

**Gammagrafía**

**Diagnósticos y tratamientos médicos**











# **LA RADIACIÓN GAMMA. LA LUZ MÁS PENETRANTE**

YOLANDA MORILLA GARCÍA

*Centro Nacional de Aceleradores, Junta de Andalucía, CSIC,  
Universidad de Sevilla*

**UNA GRAN PROPORCIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA** es de tipo no ionizante; su energía asociada no es suficiente para arrancar electrones de los átomos o moléculas que componen la materia y los seres vivos. La luz visible, así como las ondas de radio o las microondas, son radiaciones no ionizantes. Sin embargo, otra parte del espectro electromagnético contiene radiación ionizante; son la radiación X y la radiación gamma. Cuando este tipo de radiación interactúa con materiales o tejidos, se producen cambios a nivel atómico. Dichos cambios suelen implicar la producción de “iones” (átomos o moléculas con carga eléctrica); de ahí el término de radiación “ionizante”.

La radiación gamma o rayos gamma, al igual que la luz visible, está constituida por fotones, pero con energías de hasta miles de millones de veces más alta y longitudes de onda inferiores a  $10^{-11}$  m. Esta radiación es producida generalmente por desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía, por desintegración de isótopos radiactivos, por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón y por fenómenos astrofísicos de gran violencia. Aunque el rango energético es muy amplio, en general oscila entre cientos de kiloelectronvoltios (keV) hasta valores de teraelectronvoltios (TeV), se puede considerar que es la luz más penetrante. Los rayos gamma pueden penetrar fácilmente las barreras que detienen a otro tipo de radiación, como las partículas alfa y beta. Según el rango energético, se necesitaría del orden de varios centímetros de un material denso como el plomo o metros de hormigón para poder detener o al menos atenuar esta radiación.

Esto constituye un peligro para los organismos vivos; los rayos gamma pueden atravesarlos por completo provocando ionizaciones que dañan órganos, tejidos, células y hasta el ADN. El daño que causa la radiación depende de la dosis a la que se expone, o dosis absorbida, expresada en una unidad llamada gray (Gy). El tipo y el grado de deterioro causado depende del tipo de radiación y de la sensibilidad de los diferentes órganos y tejidos. Teniendo esto en cuenta, se mide la capacidad de la radiación ionizante para causar daños utilizando la dosis efectiva, cuya unidad es el sievert (Sv).

Por encima de determinados umbrales, la radiación puede afectar el funcionamiento de órganos y tejidos, y producir efectos agudos tales como enrojecimiento de la piel, caída del cabello, quemaduras por radiación o síndrome de irradiación aguda. Estos efectos son más intensos cuanto mayor es la dosis de exposición y más corto el periodo en el que tiene lugar; cuanto menor es la tasa de dosis, el riesgo es más bajo porque hay más probabilidades de que se reparen los daños. No obstante, sigue existiendo un riesgo de efectos a largo plazo, como el cáncer, que pueden tardar años, o incluso decenios, en aparecer. No siempre aparecen efectos de este tipo, pero la probabilidad de que se produzcan es proporcional a la dosis de radiación. El riesgo es mayor para los niños y adolescentes, pues son mucho más sensibles que los adultos<sup>1</sup>.

Por término medio, el 80% de la dosis anual de radiación de fondo que recibe una persona procede de fuentes de radiación naturales, terrestres y cósmicas. La población recibe continuamente, rayos gamma emitidos por elementos radiactivos naturales existentes en la Tierra. Tanto al aire libre como en edificios, según la procedencia de los materiales de construcción empleados. La mayoría de los átomos en la Tierra son estables, pero existen algunos tipos de átomos inestables denominados radiactivos que decaen cuando emiten energía en forma de radiación ionizante (por ejemplo, partículas alfa, partículas beta, rayos gamma o neutrones)<sup>2</sup>.

---

1 <https://www.who.int/es>

2 <https://www.csn.es>

Los niveles de la radiación de fondo varían geográficamente debido a diferencias geológicas. A diferencia de la mayoría de las rocas sedimentarias, las rocas ígneas, como el granito o el basalto, presentan un nivel de radiactividad importante ya que muchos contienen los tres elementos radiactivos naturales más destacables (potasio, torio y uranio). Por otro lado, los materiales de construcción también contienen radionúclidos de origen natural que emiten radiación gamma a la que estamos expuestos en los edificios. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y ENUSA (Empresa Nacional del Uranio, S.A.) han realizado el denominado proyecto MARNA, en el que evalúan los niveles de radiación gamma natural en España; el mapa que muestra la distribución puede consultarse en<sup>3</sup>. Las tasas de exposición más altas de la España peninsular se concentran en el sur de Galicia, el sur de Castilla y León y el norte de Extremadura; la región levantina y gran parte de Andalucía son las regiones de menor exposición. La dosis media en España debida a la radiación gamma terrestre es de 0.48 mSv/año, siendo Murcia la provincia con fondo más bajo (0.39 mSv/año) y Pontevedra la más expuesta (1.45 mSv/año). Aun así, España es un país con un fondo radiactivo que podemos considerar bajo<sup>4</sup>.

Otra fuente natural es el sol, con las denominadas erupciones solares, y el espacio exterior, donde se producen los estallidos de rayos gamma (GRB, del inglés gamma-ray burst)<sup>5</sup>. Estos estallidos superenergéticos surgen cuando tiene lugar un evento cósmico muy violento, tal que se generan emisiones de radiación que podrían tener efectos demoledores en los organismos de los planetas que alcanzasen. En 10 segundos emiten toda la energía que el Sol produce en 10.000 millones de años. La mayoría ocurren con muy poca frecuencia, se detectan a varios miles de millones de años luz, fuera de nuestra galaxia y a pesar de su intensidad, se consideran inofensivos para nuestro planeta. Aunque se cree que una explosión cercana, dentro de la Vía Láctea, dirigida hacia la Tierra, supondría la extinción masiva. Las

3 <https://www.csn.es/mapa-de-radiacion-gamma-natural-marna-mapa>

4 <https://desayunoconfotones.org/2015/09/24/la-espana-radiactiva>

5 [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Search?SearchText=gamma+radiation&result\\_type=images](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=gamma+radiation&result_type=images)

investigaciones sugieren que las explosiones de rayos gamma no solo podrían ser las responsables de algunas de las extinciones que se han dado en la Tierra, sino que podrían ser limitantes de la existencia de vida y provocaría la creación de formas de vida más resilientes a la radiación. De hecho, existe la teoría de que la Tierra recibiera el impacto de una de estas explosiones hace unos 440 millones de años, pudiendo provocar un descenso de la biodiversidad cuando tuvieron lugar las extinciones masivas del Ordovícico-Silúrcio<sup>6</sup>.

Es de creciente interés científico conocer su papel en la evolución biológica y la capacidad protectora de la atmósfera, donde los rayos gamma son absorbidos. Gracias a que el efecto de un sólo fotón con energía de teraelectronvoltios en la atmósfera es medible, utilizando telescopios espaciales, es posible estudiar fuentes de rayos gamma de muy alta energía desde la Tierra. Estos fotones son absorbidos por la atmósfera desencadenando una cascada de partículas secundarias detectables directamente en la superficie terrestre.

Las capas más externas de la atmósfera actúan, como un escudo protector, atenuando el efecto perjudicial de las radiaciones para los seres vivos. Es la región denominada ionosfera, donde los rayos X, los rayos gamma y parte de los ultravioleta más energéticos, son absorbidos por los gases presentes en ella (hidrógeno, oxígeno y nitrógeno). Esta zona está situada entre la mesosfera, la termosfera y la exosfera. Se trata de una región que contiene un número elevado de partículas cargadas de electricidad, creadas por la interacción de la radiación que proviene del espacio exterior, principalmente de nuestra estrella el Sol.

Según un estudio internacional en el que ha participado el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)<sup>7</sup>, estos fenómenos cósmicos pueden afectar a procesos vitales, sobre todo en los organismos oceánicos, con mayor fotosensibilidad. Los destellos de rayos gamma se

---

6 Piran, T. & Jiménez, R. (2014). Possible role of gamma ray burst on life extinction in the Universe. *Physical Review Letters*, 113, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.231102>.

7 Peñate, L., Martín, O., Cárdenas, R. & Agustí, S. (2010). Short-term effects of gamma ray bursts on oceanic photosynthesis. *Astrophysics and Space Science*, 330: 21-217. DOI: 10.1007/s10509-010-0450-7

aprecian a corto plazo en forma de auroras boreales, en las que en un corto periodo de tiempo se depositan intensas dosis de radiación ultravioleta. Sin embargo, a medio plazo se observa como las emisiones puntuales de rayos gamma pueden contribuir a la disminución de la capa de ozono. Cuanto mayor sea la degradación, la radiación ultravioleta procedente de estas emisiones alcanzaría mayor profundidad dentro del agua, y esto bloquearía la fotosíntesis submarina, generadora de gran parte del oxígeno existente en la biosfera. Por otro lado, podrían dañar el ADN y aumentar la mortalidad celular en los organismos más sensibles. Un desequilibrio en el fitoplancton oceánico podría transmitirse a través de toda la cadena trófica y llegar a los niveles superiores.

Actualmente, gran parte de esta radiación natural no supone ningún riesgo inminente para la humanidad. La exposición humana a la radiación proviene también de fuentes artificiales. Utilizando esta luz de manera segura, con la instrumentación adecuada, podemos sacar mucho provecho de ella, ya que ofrece beneficios en medicina, agricultura, medio ambiente, industria, el sector aeroespacial o en patrimonio histórico. Sin embargo, como en toda actividad, cuando su uso conlleva riesgos es necesario adoptar medidas específicas para proteger a las personas y al medio ambiente. La industria nuclear, los hospitales y los centros de investigación vierten al medio ambiente materiales radiactivos. Estos vertidos se hacen de forma controlada y respetando los límites fijados. Las leyes sobre el uso de las fuentes de radiación y la protección radiológica son responsabilidad de cada país, en España es regulado por el CSN. Aunque el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)<sup>8</sup> presta apoyo a través de normas de seguridad internacionales que tienen por objeto la protección de los trabajadores y los pacientes, así como del público en general y el medio ambiente, frente a los posibles efectos nocivos de la radiación ionizante.

El uso médico de la radiación representa el 98% de la dosis poblacional con origen en fuentes artificiales y el 20% de la exposición total de la población. Las dosis que reciben las personas a causa de las radiaciones artificiales son, sin considerar los accidentes, mucho más

---

8 <https://www.iaea.org/es>

pequeñas que las dosis que tienen su origen en la radiación natural. Las radiaciones empleadas en medicina nuclear para diagnóstico y tratamiento de tumores son, con diferencia, la mayor fuente de exposición a la que están sometidos los miembros del público. En particular, existen técnicas de radioterapia basadas en radiación gamma, así como técnicas de imagen para el diagnóstico (p.e. la tomografía por emisión de positrones, PET, del inglés, Positron Emission Tomography, que puede detectar las manifestaciones tempranas de enfermedades, antes que otros exámenes por imágenes).

Existen otras muchas aplicaciones de la radiación gamma, como es el control de plagas por método respetuoso con medio ambiente (por ejemplo, la esterilización de moscas y mosquitos); la contribución a mejoras genéticas, acelerando mutaciones para la mejora de variedades de plantas; la esterilización, eliminando las bacterias, para instrumentación quirúrgica, preservación de alimentos, o fabricación de productos terapéuticos y farmacéuticos; una técnica de diagnóstico, como la gammagrafía, es utilizada no sólo en la industria naval y metalúrgica sino en patrimonio cultural; parte de los ensayos de cualificación de materiales y componentes electrónicos para uso aeroespacial también son llevados a cabo mediante exposición a radiación gamma.



# EL LÁSER. UNA “LUZ” PARA EL FUTURO

ENRIQUE F. HITA VILLAVARDE

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*

**es Luz**

- Visible o no.
- Muy monocromática.
- Muy coherente.
- Continua o pulsada.
- Etc.

**es Energía**

- Transportable.
- Dirigible.
- Concentrable.
- Posibilidad de alta potencia.
- Etc.

**es Progreso**

- Física de Altas Energías.
- Física Relativista.
- Medicina Molecular y Celular.
- Energía Nuclear.
- Etc.

**es Herramienta**

- De registro.
- De corte.
- De soldadura.
- De grabado.
- Etc.

**LÁSER**  
¿Qué es?

**es Desarrollo científico**

- Física.
- Química.
- Biología.
- Medicina.
- Etc.

**es Instrumento**

- Exploradores.
- Lectores de CD y DVD.
- Punteros y Señaladores.
- Detectores de alarma.
- Etc.

**es Salud**

- Cirugía.
- Radiología.
- Oncología.
- Oftalmología.
- Etc.

**es**  
**FUTURO**



## EL LÁSER. UNA “LUZ” PARA EL FUTURO

ENRIQUE F. HITA VILLAVERDE

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*

**POSIBLEMENTE UNO DE LOS VOCABLOS QUE MAYOR** impacto haya tenido, no ya en el mundo de la Ciencia y la Tecnología actuales, sino también en la misma vida cotidiana, tal vez sea la palabra LÁSER. Y es que este descubrimiento ha invadido de forma espectacular todos los ámbitos en los que el ser humano se desenvuelve en la actualidad, abarcando aplicaciones y utilidades que van desde simples juguetes para niños hasta las más sofisticadas instalaciones para el desarrollo científico, pasando por revolucionarias técnicas sanitarias, instrumentación de control a todos los niveles, dispositivos militares de defensa, estudios astronómicos, registros tridimensionales, física de altas energías, fenómenos relativistas, etc.

Ante esta “invasión” en el mundo de hoy en día, no parece exagerado afirmar que la evolución Científico-Técnica actual haya venido marcada por dos grandes descubrimientos del siglo pasado: El Semiconductor y el Láser y que este último haya originado, en buena medida que, si al siglo XX se le denominó el siglo de la electrónica, al XXI se le conozca ya como el siglo de la Fotónica, en definitiva, *el siglo de la “LUZ” y de las tecnologías basadas en la luz*, como ha sugerido la UNESCO. En cualquier caso, ambos hallazgos no se encuentran, ni mucho menos, desconectados pues los láseres de semiconductor están cubriendo un amplio capítulo de la tecnología actual.

No obstante, este dispositivo emisor de luz, aunque esté tan fuertemente extendido, no parece ser suficientemente conocido en lo que a su origen, posibilidades y limitaciones se refiere, observándose, con tal vez demasiada frecuencia, sensacionalismos y extensiones

de utilidad totalmente carentes de fundamento o, al menos, sin constatación científica suficiente. Tal vez la misma denominación cotidiana de “RAYOS LÁSER”, sea un ejemplo de lo que acabamos de decir, denominación con la que se pretende, posiblemente con fines comerciales o sensacionalistas, atribuir a esta fuente de luz connotaciones de destrucción o peligrosidad, siendo frecuente también encontrar en Internet denominaciones como “El Rayo de la Muerte”, “Armas Láser” o frases como “El Rayo que Mata y Cura...”, etc.

El láser como tal, es decir el de luz visible, es un descubrimiento relativamente reciente, pues el primero, realizado por Teodoro Maiman, data de 1960, aunque tuviera un antecedente, el denominado Másér, para la radiación de microondas.

Tal vez la primera pregunta que cabría hacerse es la de ¿por qué se le denomina así?. Pues bien, esta denominación corresponde a un acrónimo de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, que en español es “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación”.

De hecho, esta definición, aunque contiene toda la información sobre lo que es un láser, no es muy intuitiva y, tal vez, requiera entrar en ella con algo de detalle. Como se puede observar, se contienen en la misma dos términos conceptuales: “*luz y radiación*”, y dos procesos físicos: “*amplificación y emisión estimulada*”. De hecho, la luz es una sensación psicológica producida en algunos seres vivos por la acción de un agente externo al que conocemos como energía radiante que, cuando es capaz de estimular el mecanismo visual del receptor, se le denomina energía radiante visible y que es de la misma naturaleza que otras radiaciones que no lo hacen tales como la radiación ultravioleta, la infrarroja, las microondas, la radiación X, etc. Lo que sucede es que vocablo LUZ ha adquirido una fuerza tal que se le utiliza para designar incluso a radiaciones no visibles, y muchas de estas radiaciones no visibles son susceptibles también de generar la emisión estimulada.

La naturaleza de la energía radiante, es decir la explicación de los fenómenos de su generación, propagación e interacción con la materia o con ella misma, puede realizarse, según el fenómeno del que se trate, asumiendo, o bien que se trata de una perturbación ondulatoria de

naturaleza electromagnética la cual se caracteriza por su frecuencia o su longitud de onda, su intensidad (o energía transportada por unidad de área y unidad de tiempo y que está relacionada con la amplitud de la perturbación), y su velocidad de propagación (que depende del medio en el que se propague), o bien que se trata de un conjunto de fotones, o paquetes de energía, caracterizados por su frecuencia relacionada esta con aquella por la expresión:  $E = h \cdot \nu$ , donde  $E$  es la energía del fotón,  $h$  es la llamada constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia. La intensidad en este caso viene asociada al número de fotones que se transportan por unidad de área y de tiempo.

En un dispositivo láser, una pequeña cantidad de estas radiaciones se amplifica, mediante la denominada emisión estimulada, en un medio activo previamente excitado. Todo el proceso se lleva a cabo en el interior de un recinto apropiado denominado “*cavidad láser*” del que emerge, en unas condiciones muy específicas, la radiación amplificada o láser.

Una de las características pretendidas, al menos inicialmente, con la emisión láser fue la de poseer una muy alta coherencia, termino ligado a la monocromaticidad y constancia de fase de la emisión o igualdad de todos los fotones emitidos por el dispositivo, y a la conformación del haz emitido, pues ello implicaría conseguir un alto dominio de los fenómenos de interferencia y difracción.

Con el fin de fijar ideas, si comparamos la emisión de una “bombilla” convencional con la de un láser, observaremos que la radiación emitida por la bombilla es un “conglomerado” de radiaciones simples de muy diversa frecuencia y no correlacionadas entre sí, que se esparcen por todo el espacio, con lo cual su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia, mientras que en el caso del láser se trata de una radiación casi monocromática que se propaga en forma de haz prácticamente cilíndrico de pequeña sección transversal, dependiendo de la forma y tamaño de la cavidad láser, con muy poca divergencia, es decir esparcimiento, con lo cual su intensidad permanece prácticamente constante con la distancia y por lo tanto puede ser enviada a lugares muy lejanos, como pueden ser los objetos astronómicos, manteniendo su capacidad de interacción.

A su vez, estos haces cilíndricos de pequeña sección, del orden de muy pocos milímetros cuadrados, pueden ser susceptibles de

concentración utilizando concentradores apropiados como puede ser una simple lente convergente, alcanzándose entonces intensidades altísimas con unas posibilidades de actuación sorprendentes cuando interacciona con la materia, pudiéndose llegar a producir efectos realmente espectaculares sobre áreas muy pequeñas, lo que permite estudiar al límite los fenómenos de interacción de la radiación con la materia y, por lo tanto, el conocimiento de la misma. Obsérvese que, si la energía que transportan los haces láser es absorbida por la materia, ésta se calentará pudiendo llegar incluso a vaporizarse con lo que ello puede implicar.

Otras posibilidades que presentan los dispositivos láser actuales son las emisiones de muy alta potencia, parámetro éste relacionado con la cantidad de medio activo en el dispositivo o en las técnicas de amplificación que se utilicen; o bien la emisión continua o pulsada, llegándose en la actualidad a emisiones de pulsos extremadamente cortos, lo que, aunque está reñido con el concepto clásico de coherencia, presenta unas posibilidades de aplicación también sorprendentes.

A su vez, estas formas de emisión son susceptibles de ser guiadas mediante el empleo de fibras ópticas a sitios muy concretos inicialmente inaccesibles para el haz ordinario, lo que también aumenta enormemente la posibilidad de aplicación de estos haces de luz en lugares ocultos como pueden ser los órganos internos del cuerpo humano.

Encontrar medios activos apropiados susceptibles de excitación y emisión estimulada es uno de los principales problemas en la investigación de la emisión láser, aunque, en la actualidad, cada vez son mayores los hallazgos en este terreno en el cual el dopaje de los materiales está jugando un papel trascendental y extendiéndose las sustancias activas a todos los estados de la materia, de ahí que se hable de láseres de gas, de líquidos y de sólidos.

En el momento actual y en lo que al tamaño del dispositivo se refiere, los láseres existentes varían desde el de un grano de arroz hasta el de un edificio, llegándose a conseguir emisiones con potencias del orden del Exavatio ( $10^{18}$  vatios), es decir, un trillón de vatios, en pulsos ultracortos del orden del Attosegundo ( $10^{-18}$  s), es decir, la trillonésima parte de un segundo.

En cuanto a frecuencia de emisión se refiere se consiguen láseres que emiten desde el ultravioleta al infrarrojo e incluso en milimétricas y, a veces, sintonizables.

En lo concerniente a monocromaticidad, se consiguen emisiones con una anchura espectral relativa de  $\Delta\nu/\nu = 10^{-12}$ .

En resumen, podemos afirmar que en la actualidad se puede enfocar luz con la potencia de mil centrales hidráulicas sobre una superficie del tamaño del núcleo de una célula, lo que acelera electrones hasta cerca de la velocidad de la luz en tiempos de un femtosegundo ( $10^{-15}$  segundos), es decir una milésima de billonésima de segundo.

La afirmación anterior debe ser interpretada con precaución, pues se trata de potencias, no de energías, téngase en cuenta que una energía pequeña de 1 julio desarrollada en un femtosegundo origina una potencia muy alta, del orden del petavatio ( $10^{15}$  vatios), es decir mil billones de vatios. Uno de los pocos láseres en el mundo de petavatio lo tenemos en el CLPU (Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos) de Salamanca.

Cabría preguntarse ahora ¿cuáles son las perspectivas que se presentan en la actualidad relacionadas con la aplicación de estos dispositivos láser dotados de las características que les adornan?, la respuesta siempre ha de ser parcial pues sería materialmente imposible hacer una relación exhaustiva de las mismas, pero por citar algunas de ellas:

1. Derivadas de la alta monocromaticidad: Control muy fino de los fenómenos de interferencia y difracción: Interferometría, Holografía (imágenes en 3D), etc.
2. Derivadas de la alta direccionalidad: Punteros láser, señaladores de alcance, control y alineación de sistemas ópticos, sistemas detectores de blancos, estudios astronómicos, etc.
3. Derivadas de la alta potencia e intensidad: Los láseres, ligados al concepto de “luz extrema”, se están convirtiendo en los motores de la dinámica electrónica posibilitando el estudio de los fenómenos de Interacción Radiación-Materia con respuestas no lineales, generación de

armónicos, confinación del plasma para la fusión nuclear y con aplicaciones en radioterapia de precisión, imágenes médicas de alta resolución, Sistemas de corte y taladro a diferentes niveles, etc.

4. Derivadas de la emisión ultra rápida (Láseres pulsados a intervalos muy cortos): Se han desarrollado los denominados Peines de Frecuencias para la medida “hiper-fina” de tiempos y frecuencias (reloj láser). Se posibilita el estudio de las evoluciones atómico-moleculares con aplicaciones en espectroscopía, desarrollo de la femtoquímica y la femtobiología, óptica relativista, etc.

¡Y la evolución continúa pues la investigación no se detiene!

Hoy se pueden conseguir densidades de energía comparables a las existentes en las estrellas y observar fenómenos naturales con transiciones del orden de  $10^{-15}$  s.

Todo ello nos permite afirmar que el láser nos está introduciendo de lleno en las fronteras de la ciencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, B. *et al.* (Varios autores del CLPU) (2010). *El Láser, la luz de nuestro tiempo*. Ed. Globalia.
- CASAS, J. (1994). *Óptica*. Universidad de Zaragoza, Ed. Librería Pons.
- HECH, E. (2000). *Óptica*. Addison Wesley Iberoamericana.
- HITA, E. (2020). La luz láser, una herramienta para la ciencia y la técnica del siglo XXI. En B. VALDÉS (ed.) *La luz: vida, ciencia, progreso*: 123-172. Málaga, Instituto de Academias de Andalucía.
- MILLER, A. *et al.* (Varios autores) (2010). *Investigación y Ciencia*. Temas 60. Física y aplicaciones del láser. Prensa Científica S.A. 2º trimestre.
- SILFVAST, W.T. (2012). *Laser Fundamentals*. Ed. Cambridge University Press.
- SVELTO, O. (1976). *Principles of Lasers*. Ed. Plenum Press.



# LA PERCEPCIÓN DE LA LUZ POR EL SISTEMA VISUAL HUMANO. EL COLOR

JAVIER ROMERO MORA

Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada

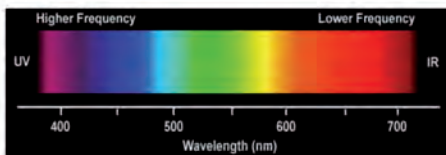


Fig. 1. Espectro electromagnético de la luz.

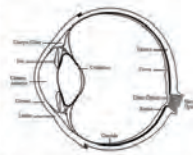


Fig. 2a. Esquema del ojo humano.

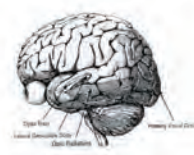


Fig. 2b. Sistema visual humano.

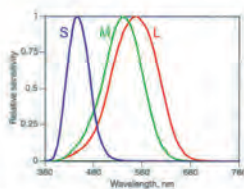


Fig. 3. Sensibilidad espectral de los conos LM y S.

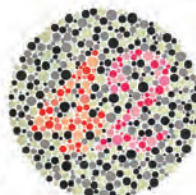


Fig. 4. Lámina del test de Ishihara para la detección de anomalías en la visión del color.



Fig. 5a. Mezcla aditiva del color con luces roja, verde y azul.



Fig. 5b. Mezcla sustractiva de color con filtros amarillo, magenta y cian.



Fig. 6a. Círculo cromático NCS, representación del tono.

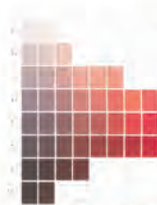


Fig. 6b. Hoja de igual tono del atlas NCS, representación de la claridad y el croma.

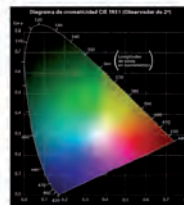


Fig. 7. Diagrama de cromaticidad CIE1931.

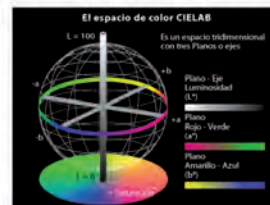


Fig. 8. Espacio de color CIELAB.

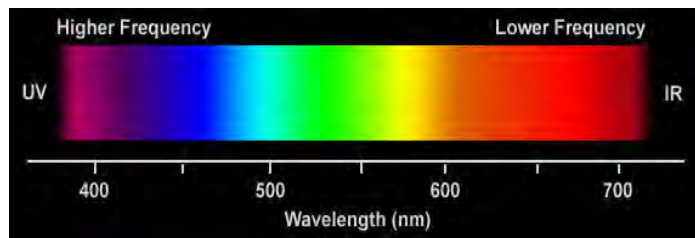


# LA PERCEPCIÓN DE LA LUZ POR EL SISTEMA VISUAL HUMANO. EL COLOR

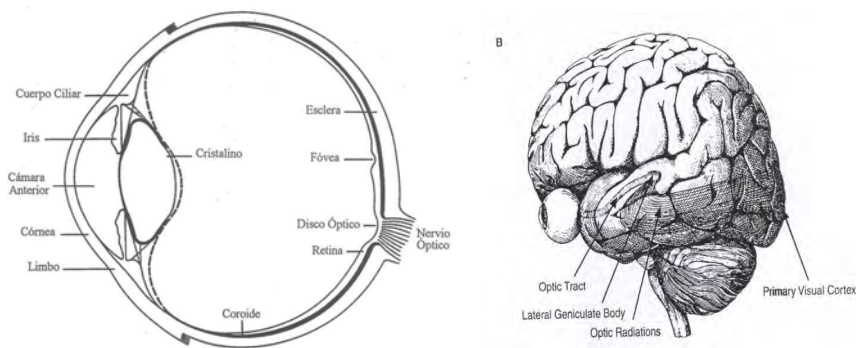
JAVIER ROMERO MORA

*Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*

**EL SISTEMA VISUAL HUMANO, FORMADO** por el ojo y el cerebro, es sensible a las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda entre 380 y 760 nm aproximadamente (figura 1). Es a lo que llamamos LUZ.



**Fig. 1. Espectro electromagnético de la luz.**

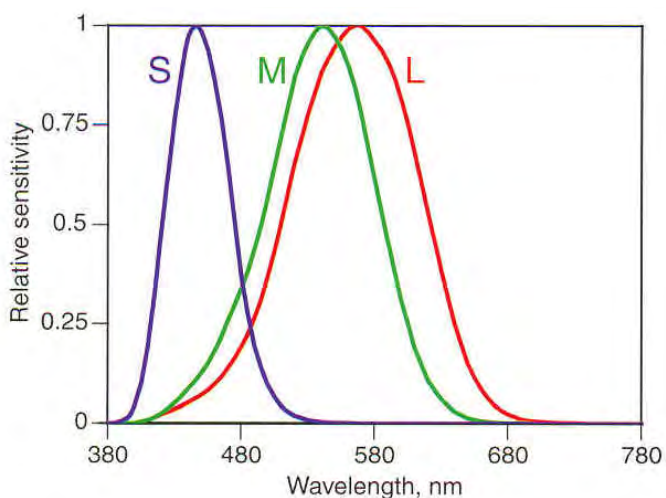


**Fig. 2. Izquierda., esquema del ojo humano. Derecha, sistema visual humano**

Pero el sistema visual humano (figura 2), no es sólo un detector de radiación, sino que también procesa las señales eléctricas generadas en la retina, dando lugar a lo que conocemos por percepción visual completa, la que incluye: la percepción de la cantidad de luz, del color, de las formas, el movimiento, la profundidad y la textura de los objetos que nos rodean.

El color que percibimos depende de forma principal de la cantidad de luz en el ambiente. Se distinguen tres niveles de iluminación: fotópico, mesópico y escotópico. El primero corresponde a los niveles altos y medios de iluminación, en los que la percepción del color es completa. Es el nivel de la mayor parte del día. El nivel mesópico corresponde a los niveles de iluminación en los que los colores de los objetos se observan, pero palidecen. Es el nivel en los atardeceres y los amaneceres. El nivel escotópico se corresponde con la percepción de los objetos sin color. Es el nivel de la noche o próximo a la oscuridad, es decir, los niveles muy bajos de iluminación.

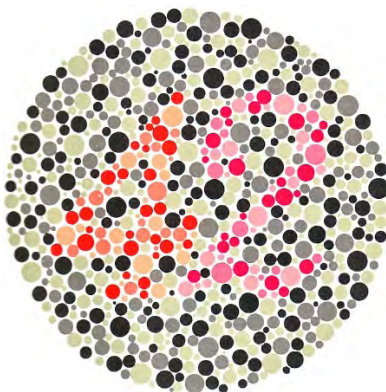
La percepción del color la posibilitan las células fotorreceptoras ubicadas en la retina que llamamos conos y que son de tres tipos: los conos L, M y S, sensibles a las largas, medias y cortas longitudes de onda del espectro electromagnético visible (figura 3).



**Fig. 3. Sensibilidad espectral de los conos L, M y S**

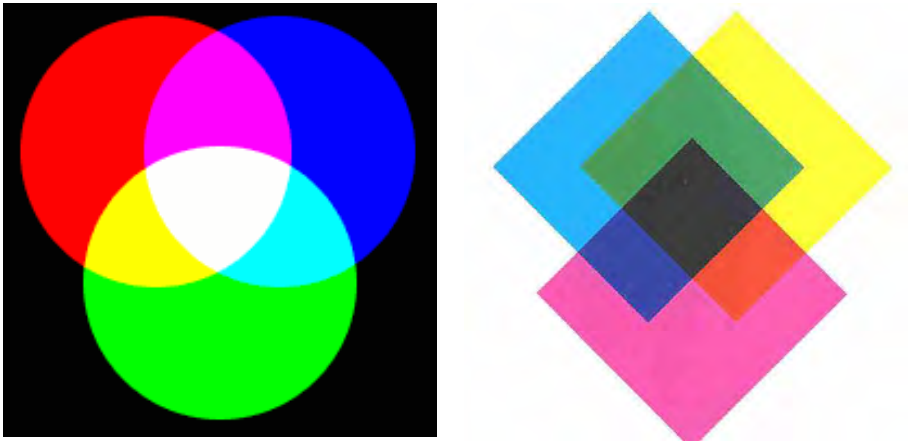
La combinación posterior de las señales eléctricas generadas en estos conos por las células ganglionares de la retina, el núcleo geniculado lateral (LGN) y el córtex cerebral dará lugar a la percepción del color. Estas células necesitan un nivel fotópico o mesópico para su activación. Para el nivel escotópico, disponemos de los bastones en la retina, que son de un solo tipo, y que permiten una visión monocroma (escala de grises).

La ausencia o debilidad de un tipo de cono en algunas personas da lugar a lo que llamamos anomalías en la visión del color o popularmente daltonismo. Este tipo de anomalías se da principalmente en varones, el 8% de ellos, y son en su mayoría del tipo conocido como confusiones rojo-verde. En la figura 4, se muestra una lámina del test de Ishihara, diseñada para detectar daltónicos.



**Fig. 4. Lámina del test de Ishihara para detección de anomalías en la visión del color.**

La percepción del color es básicamente tridimensional. Con ello nos referimos a que la dimensión tres está presente en todos los procesos relacionados con el color. Como hemos indicado, tres son los tipos de fotorreceptores de la retina que permiten la percepción humana del color. Tres son también, los primarios mínimos necesarios para la generación del color por mezcla aditiva (figura 5, izquierda), que es la empleada en dispositivos artificiales de generación de color como las pantallas de ordenador o las televisiones. Y también son tres para las mezclas sustractivas (figura 5, derecha), como las empleadas en artes en las impresoras o en las artes gráficas en general.

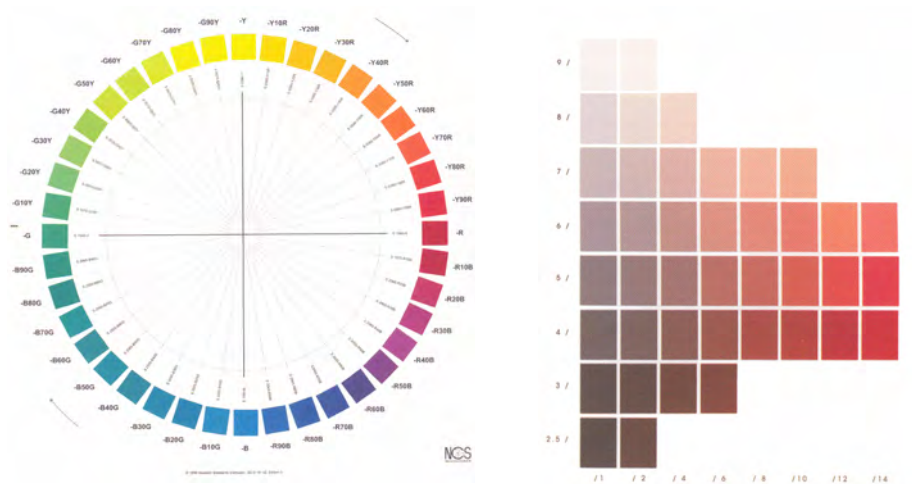


**Fig. 5. Izquierda, mezcla aditiva del color con luces roja, verde y azul. Derecha, mezcla sustractiva del color con filtros amarillo, magenta y cian.**

También son tres los atributos perceptivos del color, es decir, los atributos de la percepción con los describimos el color. En el caso de objetos opacos o transparentes: la claridad, el tono y el croma. El primero tiene que ver con la cantidad de luz que exhibe el objeto, más claro o más oscuro. El segundo con la descripción que a menudo hacemos única del color: rojo, naranja, amarillo, verde, azul o púrpura. El tercero con la pureza del mismo, más vivo o menos vivo. En la figura 6, izquierda, presentamos un círculo cromático de tonos. En la figura 6, derecha, una lámina del atlas NCS (del inglés Natural Colour System) con colores de un mismo tono y distintas claridades, dimensión vertical, o cromas, dimensión horizontal.

Para el caso de luces directas, como una lámpara o un monitor, se emplean los atributos: luminosidad, tono y saturación. El primero relacionado con la cantidad absoluta de luz y la saturación relacionada con la pureza del color que presente la luz en términos absolutos.

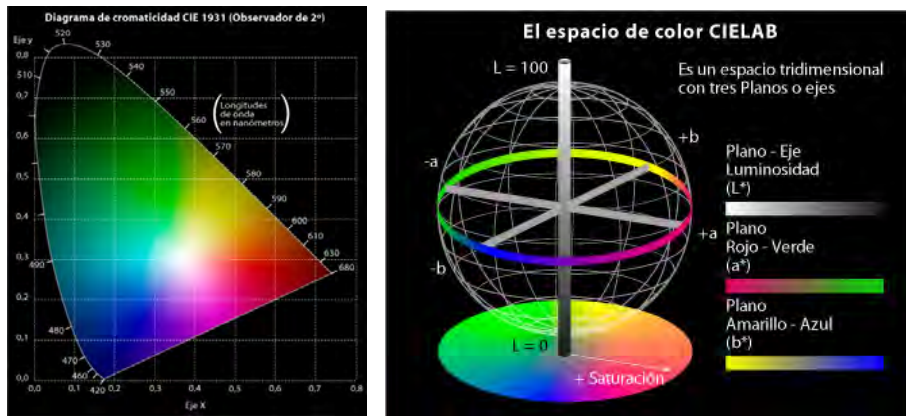
En la primera mitad del siglo XX se empezaron a desarrollar sistema de representación del color que ayudaran a medir el color con números. Esto era muy importante en la industria de la fotografía, la textil y la de pinturas. Se hacía necesario medir lo más objetivamente el color y hacer una evaluación numérica del mismo independiente del observador. Para ello, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), propuso y



**Fig. 6. Izquierda, círculo cromático NCS, representación del tono. Derecha, hoja de igual tono del atlas NCS, representación de la claridad y el croma.**

aprobó el sistema CIE1931, (figura 7, izquierda). Con este sistema se pudo especificar cualquier color mediante 3 números, llamados coordenadas de color: dos coordenadas de cromaticidad en un plano, el de la figura 7, izquierda, y una más que evaluara la cantidad de luz. Esta medida del color ha dado lugar a la Colorimetría, de gran importancia en la industria tradicional, y que ha ampliado su importancia en la actualidad en la construcción y evaluación de dispositivos multimedia.

Sin embargo, la evaluación numérica del color no es algo fácil ni que haya alcanzado niveles de satisfacción óptimos. Al fin y al cabo, medir el color es medir una sensación, es decir, es una medida psicofísica. En la percepción de un color influye no sólo el observador individual, sino, también, el nivel de iluminación, el entorno que rodea al objeto del que queremos medir el color (adaptación espacial) o la calidad cromática de la luz que ilumina la escena (adaptación temporal). Todo ello ha llevado a proponer sistemas basados en los “modelos de apariencia de color” de los que el más sencillo es el sistema CIELAB (figura 7, derecha). Además, con estos modelos se pretende evaluar numéricamente los atributos perceptivos del color que se han descrito antes.



**Fig. 7. Izquierda, diagrama de cromaticidad CIE 1931. Derecha, espacio de color CIELAB**

Podemos decir que la Colorimetría, junto con la Fotometría, son las dos disciplinas que miden la percepción visual del espectro electromagnético. Los retos actuales de la Colorimetría son dos. El ya citado de conseguir una medida del color que represente adecuadamente los atributos perceptivos del color. El segundo tiene que ver con la evaluación de diferencias de color y tolerancias de color en los procesos industriales, es decir, qué diferencias en las coordenadas de color en un producto respecto a un patrón no son distinguibles por un consumidor, ya que nuestra capacidad para determinar diferencias de color entre objetos no es ilimitada y en los procesos industriales no es fácil reproducir siempre coordenadas de color con muy alta precisión.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERNS, R.S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*, 4th edition. Wiley,
- SHEVELL, S.K. (2003). *The Science of Color*, 2nd edition. Elsevier.

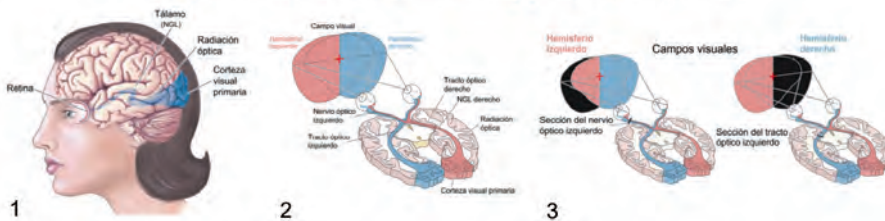


# ÁREAS VISUALES CENTRALES Y LA CONSTRUCCIÓN DE LAS IMÁGENES POR EL CEREBRO

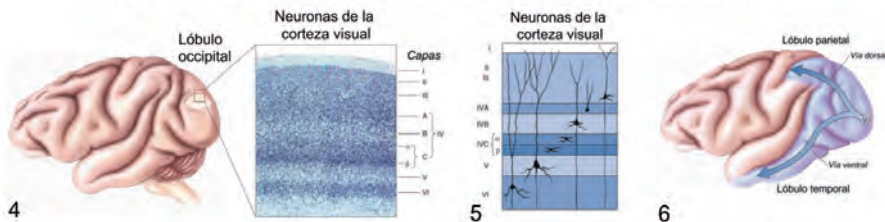
JOSÉ LÓPEZ BARNEO

*Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla*

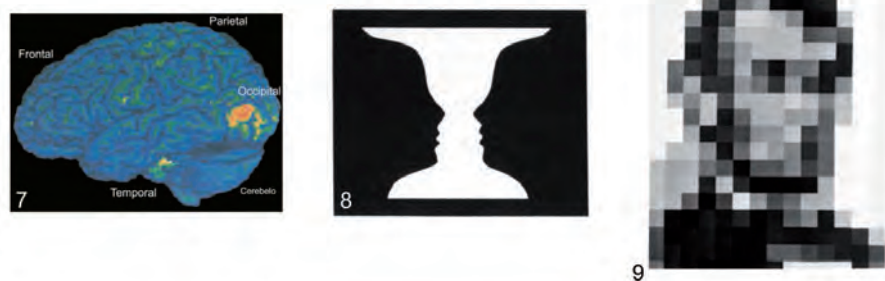
## Vías visuales cerebrales: lesiones y pérdidas de visión



## Neuronas de la corteza cerebral/áreas visuales asociativas



## Percepción visual





# ÁREAS VISUALES CENTRALES Y LA CONSTRUCCIÓN DE LAS IMÁGENES POR EL CEREBRO

JOSÉ LÓPEZ BARNEO

*Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla*

## VÍAS VISUALES CENTRALES

**LA FASE INICIAL DE CONVERSIÓN DE LA LUZ** del mundo exterior en señales eléctricas, que pueden ser transmitidas al sistema nervioso central e interpretadas por el cerebro humano, ocurre en la retina, donde existen unos 120 millones de fotorreceptores. Las señales de los fotorreceptores convergen en aproximadamente 1 millón de neuronas ganglionares que emiten las fibras que forman el nervio óptico. El campo receptor de la visión binocular es la zona del espacio cuyas señales luminosas pueden ser detectadas por los ojos. Como la retina de cada ojo tiene una forma casi semiesférica, recibe luz procedente de su hemisferio del campo visual y parte del hemisferio opuesto (figuras 1 y 2 de la portadilla de este capítulo). Tras salir de la órbita los nervios ópticos discurren por la base del cráneo y muy pronto se unen formando el quiasma óptico, una estructura donde se cruzan las fibras procedentes de las partes nasales (internas) de cada retina. En consecuencia, los haces de fibras que emergen del quiasma óptico (los tractos ópticos) llevan información separada de cada hemisferio del campo visual. El tracto óptico derecho lleva la información del hemisferio izquierdo (zona anaranjada en la figura 2) y el tracto óptico izquierdo transmite la información del hemisferio visual derecho (zona de color azul en la figura 2). Debido a estas características anatómicas, las lesiones de los nervios ópticos y de los tractos ópticos producen

defectos visuales diferentes. Por ejemplo, la sección del nervio óptico izquierdo causa pérdida de visión completa solo en la zona externa temporal de hemisferio izquierdo del campo visual (zona de color negro en la figura 3), ya que la visión del resto del hemisferio visual izquierdo y todo el hemisferio derecho se lleva a cabo con el ojo derecho. Por el contrario, la sección del tracto óptico izquierdo produce la pérdida completa de visión en el hemisferio contralateral (zona de color negro en la figura 3). El conocimiento de las particularidades anatómicas de las vías visuales es esencial para establecer en ocasiones diagnósticos precisos de la localización de lesiones (tumores o hemorragias) en la base del cráneo que cursan con defectos de la visión.

En el hombre (y en casi todos los mamíferos superiores) más del 90% de las fibras que discurren por los tractos ópticos terminan haciendo contactos eléctricos (sinapsis) con neuronas talámicas del núcleo geniculado lateral (NGL en las figuras 1 y 2). Los axones de las neuronas del NGL de cada lado forman un haz de fibras denominado radiación óptica que conecta con neuronas de la corteza visual primaria localizada en la zona más posterior de cada lóbulo occipital (zona llamada área 17 o V1) (figuras 1-3). Las fibras del tracto óptico que no terminan en el NGL se desvían hacia otras áreas de la base del cerebro (el tronco del encéfalo y el hipotálamo especialmente) donde contribuyen a funciones, como por ejemplo el reflejo pupilar (mayor o menor apertura de la pupila), que dependen de la cantidad de luz que el ojo recibe del exterior pero que no participan de forma directa en la formación de imágenes cerebrales. Parte de las fibras que acaban en el hipotálamo son esenciales para que los mamíferos (y muchos vertebrados) sincronicen sus ciclos biológicos circadianos intrínsecos (por ejemplo, el ciclo vigilia y sueño) con las fases alternantes de luz y oscuridad que se dan a lo largo del día.

## **PROCESADO CEREBRAL DE LAS SEÑALES VISUALES**

Las fibras de las radiaciones ópticas que alcanzan la corteza visual primaria establecen múltiples conexiones eléctricas directas

e indirectas con neuronas localizadas en diferentes capas corticales. La corteza cerebral contiene un número casi incontable de neuronas (puntitos azules en la figura 4) organizado en capas con morfología muy sofisticada y variada (ver algunos ejemplos en la figura 5). Las fibras de las radiaciones ópticas terminan en la capa IV y de allí surgen nuevas, también incontables, conexiones intracorticales. A pesar de que se tiene un conocimiento preciso de muchas de las conexiones neuronales de la corteza visual, todavía no existe una teoría general que de forma completa explique la formación de la imagen cerebral. Las neuronas corticales reciben información de áreas específicas dentro de su campo receptor y se activan por contrastes, colores, movimientos de puntos o barras de luz, etc. Se sabe que en la corteza visual primaria existe una representación (codificada en impulsos eléctricos neuronales) de las características (intensidad, longitud de onda, organización espacial, entre otras) de la señal luminosa procedente del hemisferio contralateral (figura 2) pero la estructura y la lógica operacional que subyace a la formación de esta primera “imagen” cerebral se desconoce. Tampoco se conoce con detalle como las imágenes de cada área cortical primaria se funden para formar una imagen binocular única.

Las neuronas del área visual primaria (V1 en la figura 6) emiten numerosas proyecciones nerviosas que conectan con zonas muy amplias del cerebro y que contribuyen a la formación de imágenes mejor definidas y con mayor valor adaptativo. En monos se han descrito dos vías fundamentales, cuya existencia ha sido confirmada en el hombre usando métodos modernos de estudio no invasivos tales como la resonancia magnética nuclear funcional (figura 6) o la tomografía por emisión de positrones (figura 7). Existe una vía dorsal que se propaga hacia estructuras del lóbulo parietal que contribuye a la detección e interpretación de imágenes en movimiento y que son esenciales para el control visual del comportamiento motor. Para las neuronas de esta vía es más importante la detección del movimiento que la definición precisa de lo que se mueve. Esta cualidad tiene un valor adaptativo esencial para animales y el hombre que habitan entornos en los que lo que se mueve (un depredador o un vehículo) puede atentar contra la supervivencia. Piensen que a nuestro cerebro le interesa mucho más la detección

rápida del movimiento de un coche hacia nosotros (y evitar que nos atropelle) que definir de forma precisa su color, forma o incluso tamaño. Igualmente, para una gacela de la sabana africana es ventajoso iniciar una respuesta de escape ante algo que se mueve en su campo visual sin esperar a definir de forma precisa el tipo de peligro que potencialmente le acecha. La vía ventral que conecta el área V1 con estructuras del lóbulo temporal está relacionada con el reconocimiento más preciso del mundo visual y de la forma y color de los objetos. Algunas personas que sufren lesiones en estas zonas presentan *acromatopsia*, condición que se caracteriza por percibir los objetos sin colores, aunque los receptores de la retina (conos) sean normales. Un fenómeno interesante que también se observa en algunos pacientes con lesiones por ictus focalizadas en el lóbulo temporal es la *prosopagnosia*. Se trata de individuos con una visión aparentemente normal, que pueden identificar sin error ojos, narices y bocas, pero que son incapaces de reconocer las caras. Parecen carecer de la capacidad para integrar los rasgos anatómicos que tomados en su conjunto permiten al cerebro humano el reconocimiento facial. Curiosamente, los individuos con *prosopagnosia* tampoco identifican las caras de las personas durante los sueños. Los estudios funcionales en humanos demuestran como durante la exposición a escenas visuales complejas, con elementos de varias formas, significado y en movimiento se estimula en mayor o menor medida prácticamente toda la corteza cerebral. La figura 7 ilustra una de estas respuestas cuya intensidad está codificada por un código de color: rojo>amarillo>verde. Aunque la mayor actividad neuronal se observa en el área visual primaria y en zonas cercanas del lóbulo occipital, la activación neuronal (que se puede identificar sobre el fondo azul de las zonas cerebrales no estimuladas) se extiende a áreas corticales temporales y parietales, alcanzando incluso zonas lejanas del lóbulo frontal. Esta alta conectividad cortical, sincronizada mediante una profusa red de conexiones nerviosas, es lo que determina la unión funcional de la experiencia visual con otras modalidades sensoriales, con los recuerdos y las emociones, permitiendo de este modo que nuestro cerebro perciba todo ello como una experiencia consciente única.

## LA PERCEPCIÓN VISUAL. CONSTRUCCIÓN DE LA REALIDAD POR EL CEREBRO

El estudio detallado de la Fisiología sensorial, y especialmente de la visión, ha puesto de manifiesto que nuestro sistema nervioso central no se limita a ser un receptor pasivo de la información que recibe de los órganos de los sentidos (externos e internos) sino que a partir de esa información construye activamente *imágenes sensorimotoras* del mundo exterior y del propio cuerpo que tras compararlas con las que ya tiene disponibles (almacenadas en forma de memoria) genera las respuestas motoras, cognitivas o emocionales de mayor valor adaptativo para el individuo y la especie. La forma en que percibimos el mundo (y particularmente las imágenes visuales) está condicionada no solo por las características físico-químicas de los receptores sensoriales (el tipo de señales que son capaces de detectar) sino, sobre todo, por la forma en la que el cerebro procesa la información que recibe. Este hecho explica las llamadas “ilusiones visuales” que demuestran como una misma imagen estática ambiental (que podríamos considerar como “objetiva”) puede evocar representaciones mentales (imágenes cerebrales “subjetivas”) muy distintas. Por ejemplo, aunque las señales luminosas emitidas por la figura 8 que viajan por los nervios ópticos son constantes, pequeños cambios en el análisis de los contornos y contrastes por las neuronas corticales determina que nuestro cerebro construya una imagen de dos caras enfrentadas o, alternativamente, un cáliz. Es obvio que, en muchos casos, estas diferencias en procesado de la información visual pueden evocar respuestas cognitivas e incluso motoras muy distintas. Nuestro cerebro es un órgano “pragmático”, “subjetivo” y que frecuentemente “sacrifica la precisión a la eficiencia” para de ese modo construir imágenes del mundo que le rodea con el mayor valor adaptativo posible. Un ejemplo de este proceso de construcción activa de las imágenes mentales se muestra en la figura 9. Se trata de una figura construida por cuadrados negros, blancos y grises que se detectan por la retina y se transmiten a la corteza visual. En principio, el significado de la figura como imagen mental es el de una disposición geométrica de formas claras y oscuras. No obstante, si se entornan los ojos y se difuminan

los contornos, con el objeto de inhibir las neuronas especializadas en detectar contrastes, se suele producir un proceso de construcción activa de una nueva imagen mental, diferente y mucho más elaborada que la anterior. En este caso, es posible que el observador distinga la cabeza y los rasgos faciales icónicos de un conocido presidente de los EE.UU. de América, asesinado por su deseo de abolir la esclavitud.

Naturalmente, los fotorreceptores de la retina y las vías visuales centrales permiten a nuestro cerebro disponer de una información valiosísima de la luz que nos rodea y de la forma en que ésta interacciona con los objetos del entorno. Sin embargo, la formación de las imágenes mentales del mundo está determinada por las capacidades intrínsecas innatas del sistema nervioso adquiridas durante la evolución filogénica y depende en gran medida de la información almacenada durante la ontogenia. En sentido estricto, ver es creer y creemos lo que vemos porque es útil para nuestra supervivencia.



# LA LUZ EN LA VISIÓN Y EN LA OFTALMOLOGÍA

FERNANDO ORELLANA RAMOS

*Presidente de la Academia Malagueña de Ciencias*

Todo el aparato visual está diseñado para ayudar a que la imagen se forme y se capte en la retina, se transmita al cerebro y a proteger su integridad.  
**"La retina es un trozo de cerebro que se ha asomado a la luz"**

**PRIMERA ETAPA DE LA OFTALMOLOGÍA**

Explorar el exterior del ojo.

Con una simple fuente de luz, una linterna o la luz diurna, podemos explorar el exterior del ojo.

**SEGUNDA ETAPA DE LA OFTALMOLOGÍA**

El **OFTALMOSCOPIO** fue diseñado por el Dr. Herman Von Helmholtz. Desde ese momento se comenzó a explorar el "fondo de ojo". Nos permite estudiar la retina, el nervio óptico, conocer muchas enfermedades, no solo del aparato visual, sino sistémicas: diabetes, hipertensión arterial, etc.

Con una simple luz y un mínimo instrumental podemos explorar el exterior y el interior del ojo.

Añadiendo alguna tecnología llegamos a obtener resultados, datos e imágenes totalmente impensables hace décadas. Algunos ejemplos: **RETINOSCOPIA, LÁMPARA DE HENDIDURA, TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA (OCT).**

Hay una técnica exploratoria ocular, basada en la luz, la OCT, que es simultáneamente un tomógrafo y un microscopio, que se ha convertido en una de las herramientas diagnósticas más necesarias. El futuro es la **angio-OCT**, una OCT que realiza una angiografía, pero sin usar contraste intravenoso.

**LÁSER. LA TERCERA ERA DE LA OFTALMOLOGÍA**

La oftalmología fue la primera especialidad médica en utilizar energía láser en el tratamiento de pacientes

**LÁSER ARGÓN.** Su acción es térmica y produce fotocoagulación. Su principal indicación: Retinopatía diabética; Proflaxis del desprendimiento de retina; Trombosis Retinianas; Neoformaciones o tumores intraculares.

**NEODIMIO YAG LASER.** No genera calor y su acción se basa en la producción de una ruptura o corte en los tejidos oculares, que se conoce como fotodisrupción. Está indicado para Iridotomía, Capsulotomía y Vitreolisis.

**LÁSER EXCIMER.** Puede moldear la cornea y eliminar los defectos refractivos (miopía, hipermetropía y astigmatismo). Su utilización mediante el **Lasik (laser in situ keratomileusis)** es la técnica quirúrgica más conocida y utilizada para corregir estos defectos.

**LÁSER DE FEMTOSEGUNDO.** Es un láser pulsado. Es el láser más preciso que existe en la cirugía ocular actual. Trabaja en milidécimas de segundo y reproduce con suma exactitud las microincisiones previamente diseñadas por el cirujano en el ordenador, al que está conectado. Sus indicaciones principales son: cirugía refractiva, trasplantes de córnea e intervenciones de catarata.

**OTRAS APLICACIONES DEL LÁSER EN OFTALMOLOGÍA.** **GLAUCOMÁ** (Trabeculoplastia, Iridotomía, Cidofotocoagulación transclereal). Distiquiasis recidivante, de algunos tipos de pterigión, neoformaciones cutáneas o de la superficie ocular, etc. Recientemente, Ojo seco y Blefaritis.

**PATOLOGÍA INDUCIDA POR LA LUZ**

La luz ultravioleta puede causar lesiones. Fundamentalmente queratitis, de origen natural, como ocurre en la exposición al sol en montañas nevadas sin la adecuada protección, o las de origen artificial como sucede en la soldadura.

Un fascinante fenómeno de la naturaleza, los eclipses del sol, pueden dar lugar a lesiones graves e irreversibles en la retina. Similares lesiones se pueden producir al mirar fuentes de láser.

También existen lesiones oculares iatrogénicas.



# LA LUZ EN LA VISIÓN Y EN LA OFTALMOLOGÍA

FERNANDO ORELLANA RAMOS

*Presidente de la Academia Malagueña de Ciencias*

## LA LUZ EN LA VISIÓN

**LA LUZ ES ESENCIAL PARA LA VISIÓN.** Esta energía radiante pone en marcha al complejo proceso de la visión. Sin ella, no llegaría la imagen a la retina, ni se podría transformar en la señal nerviosa que, tras ser procesada, llega a la corteza cerebral.

El proceso visual humano está ligado al sistema nervioso central. Podemos afirmar que *“La retina es un trozo de cerebro que se ha asomado a la luz”*. Todo el aparato visual está diseñado para ayudar a que la imagen se forme y se capte en la retina, se transmita al cerebro y a proteger su integridad. El mismo globo ocular está diseñado para enfocar (córnea, cristalino...), de la mejor manera posible, los rayos luminosos sobre la retina, para protegerla (esclera) para dar tono al globo (presión intraocular) y para nutrir vascularmente a la retina (coroides y sistema vascular retiniano). La misma retina, con sus diversos sistemas neuronales, capta la señal, la procesa y la transmite al interior del cerebro por el nervio óptico, quiasma y vías ópticas hasta la corteza occipital.

## LA LUZ EN LA OFTALMOLOGÍA

La luz es absolutamente necesaria para la exploración y diagnóstico y sirve para el tratamiento de enfermedades oculares, para corregir trastornos refractivos. Pero también puede ser causa de enfermedades del aparato visual.

## **a. Exploración y diagnóstico**

### *1. Explorar el exterior del ojo.*

Con una simple fuente de luz, una linterna o la luz diurna, podemos explorar el exterior del ojo. Incluso diagnosticar enfermedades sin necesidad de ningún otro medio.

### *2. Explorar el interior de ojo. El hito de la oftalmoscopia en la oftalmología.*

Hasta mediados del siglo XIX el oftalmólogo se encontraba con una frontera imposible de traspasar: la pupila.

El oftalmoscopio, diseñado por el Dr. Herman Von Helmholtz, permitió explorar el “fondo de ojo”, la única parte del cuerpo humano en la que se puede visualizar la circulación sanguínea y los vasos “in vivo”.

Este simple instrumento nos permite estudiar el interior del ojo, la retina, el nervio óptico y otras partes del aparato visual, y conocer muchas enfermedades, no solo del aparato visual, sino sistémicas, como la diabetes, la hipertensión arterial, etc.

Así pues, con una simple luz y un mínimo instrumental podemos explorar el exterior del ojo (también otras partes del aparato visual complementarios al globo ocular) y su interior. Si vamos añadiendo alguna tecnología llegamos a obtener resultados, datos e imágenes totalmente impensables hace décadas. Citaré algunos ejemplos:

*Retinoscopia.* Si hacemos que la fuente de luz tenga algunas características determinadas (por ejemplo forma de franja) podemos, al desplazarla sobre el área pupilar, estudiar el estado refractivo del ojo.

*Lámpara de Hendidura.* Si a la fuente de luz le añadimos un microscopio binocular y dispositivos para modular la luz que incide en el ojo llegamos a la “Lámpara de Hendidura”, el instrumento más universal en la exploración del polo anterior del ojo.

La luz es la base para, con otros aditamentos, explorar la visión de los colores, el estado, morfología y parámetros de la córnea (topografía, paquimetría, microscopía especular, etc.); para estudiar la estereopsis; para conocer los campos visuales, etc.

*Tomografía de coherencia óptica (OCT).* La OCT utiliza ondas de luz para obtener imágenes en corte transversal de la retina. En este sentido, la imagen de la OCT es comparable con la imagen de una resonancia magnética que proporciona una imagen de una sección del cuerpo humano.

En el caso de la OCT, podemos conseguir imágenes de secciones de la retina, del nervio óptico o del segmento anterior del ojo. La diferencia principal de la OCT respecto al resto de pruebas de imagen que proporcionan “cortes” (como el TAC, la resonancia magnética y la ecografía B) es la resolución de la imagen. En la OCT se pueden diferenciar estructuras a nivel de micrómetros (de milésimas de milímetros). Esto significa que la OCT es simultáneamente un tomógrafo y un microscopio, lo que permite observar al máximo detalle las estructuras retinianas.

## **b. Tratamiento**

La luz es fundamental en el arsenal terapéutico oftalmológico. Nos centramos en dos ejemplos: fotocoagulación y láser (terapia fotodinámica).

### *1. Fotocoagulación*

En los años 40 del siglo XX comienzan las primeras experiencias para aplicar el efecto cauterizador o coagulador de la luz en el ojo.

### *2. Láser*

La oftalmología fue la primera especialidad médica en utilizar energía láser en el tratamiento de pacientes; actualmente sigue realizando más operaciones con el uso de los rayos láser que cualquier otra especialidad.

Actualmente, los rayos láser se usan en muchas áreas de la práctica oftálmica, que incluyen enfermedades vasculares, degenerativas y tumorales de la retina, glaucoma (hipertensión ocular), cirugía refractiva, algunos procesos del polo anterior del ojo, cirugía de vías lagrimales, cirugía orbitaria, cirugía cosmética del párpado, etc.

La interacción láser-tejido puede ser fototérmica o fotoquímica. Otra diferencia está en los efectos térmicos como fotocoagulación (láser argón), fotoablación (láser excimer) o fotodisrupción (YAG láser).

Los láseres Nd:YAG y femtosegundo funcionan con similar longitud de onda, pero el efecto es diferente ya que el femtosegundo funciona con pulsos muy cortos con efectos térmicos.

Aparte de los tipos de láser que iré mencionando, que son los más utilizados en la actualidad en oftalmología, se han empleado otros como por ejemplo de Diodo, Kriptón y Dye Láser.

*2.1. Láser argón.* Con el descubrimiento del láser de argón a mediados de 1960, se vio que la luz de este láser era útil para tratar lesiones del fondo de ojo. Entre sus ventajas se encuentra la gran cantidad de energía luminosa que puede producir, el que pueda enfocarse perfectamente y el que pueda suministrarse, sea de forma continua o fraccionada.

Fue, durante décadas, el más utilizado en oftalmología. Emite dos longitudes de onda diferentes, la azul-verde (488-514 nm) y la monocromática verde (514 nm). Su acción es térmica y produce una fotocoagulación en los tejidos oculares sobre los que actúa, por lo que la principal indicación de este láser se centra en la retina. El objetivo de la terapia con este láser es producir una quemadura terapéutica en un área preseleccionada de la retina a la vez que se causa una lesión mínima al tejido circundante.

Las principales indicaciones de la fotocoagulación retiniana con láser argón son:

- a. Retinopatía diabética. La causa más frecuente de ceguera en las personas entre 20 y 65 años
- b. Profilaxis del desprendimiento de retina. Tratando los desgarros por tracción vítrea, las degeneraciones en empalizada y los agujeros retinianos.
- c. Trombosis retinianas. En sus formas isquémicas para prevenir la formación de neovasos, hemorragias intraoculares y edema retiniano.
- d. En algunas neoformaciones o tumores intraoculares.

*2.2. Neodimio yag láser.* Este tipo de láser emite en una longitud de onda de 1064 nanómetros, no genera calor y su acción se basa en la producción de una ruptura o corte en los tejidos oculares, que se conoce como fotodisrupción.

Sus indicaciones principales son:

*Iridotomía.* Está indicada en los casos en que exista un bloqueo pupilar relativo o anatómico para crear una comunicación entre la cámara anterior y posterior.

*Capsulotomía.* La opacificación de la cápsula posterior aparece tras la cirugía de cataratas en un significativo porcentaje de casos. Debido a ello se produce una disminución de la visión, que se soluciona, en consulta y en pocos minutos, con la capsulotomía con láser Yag.

*Vitreolisis.* Para tratar opacidades, bridas y flóculos vítreos. Indicación muy cuestionada.

2.3. *Láser excímero.* La fotoablación conseguida con el láser excímero es de gran precisión y dependiendo de la cantidad de tejido que se elimine, se puede moldear la cornea y eliminar los defectos refractivos presentes (miopía, hipermetropía y astigmatismo). La utilización del láser excímero mediante el Lasik (laser in situ keratomileusis) es la técnica quirúrgica más conocida y utilizada para corregir los defectos refractivos. Más de 1.200.000 de personas en el mundo ya han recurrido a esta técnica para eliminar la dependencia de sus gafas y lentillas

2.4. *Láser de femtosegundo.* Es el láser más preciso que existe en la cirugía ocular actual y representa uno de los últimos grandes avances tecnológicos en oftalmología, gracias a su rapidez y seguridad. Trabaja en millonésimas de segundo y reproduce con suma exactitud las microincisiones previamente diseñadas por el cirujano en el ordenador, al que está conectado.

Otra característica distintiva del láser de femtosegundo es que separa los tejidos emitiendo dosis mínimas de energía para producir una disrupción entre las células. De este modo, a través de luz infrarroja, evita cortes con quemaduras y transferencia de calor a la córnea. Pese a todas estas ventajas, no está indicado o no siempre es la mejor opción para determinados pacientes.

Existen dos indicaciones principales de láser de femtosegundo: cirugía refractiva y trasplantes de córnea, e intervenciones de catarata.

2.5. *Otras aplicaciones del láser en oftalmología.* Desde hace muchos años se vienen aplicando tratamientos, con diversos tipos de láser, para el glaucoma (hipertensión ocular). La trabeculoplastia se utiliza para favorecer el drenaje del humor acuoso hacia el Canal Schlemm, provocando microperforaciones en la malla trabecular y, así, disminuir la presión intraocular. La iridotomía utiliza un haz de luz láser para quemar

un orificio pequeño en el iris y crear una abertura para el movimiento libre del líquido dentro de la porción anterior del ojo. Sirve para tratar el glaucoma agudo (el temible “dolor de clavo”) y para prevenirlo. En algunos casos, puede estar indicada la ciclofotocoagulación transescleral con láser diodo disminuyendo la producción de humor acuoso.

*2.6. Miscelánea de otras aplicaciones del láser en Oftalmología.* Además de todos los tratamientos mencionados, la luz láser se ha empleado en otros procesos patológicos del aparato visual como el tratamiento distiquiasis recidivante, de algunos tipos de pterigion, neoformaciones cutáneas o de la superficie ocular, etc. Una de las últimas aplicaciones propuestas es el tratamiento láser del ojo seco y las blefaritis. Se utiliza también en la terapia fotodinámica, tratamiento que consiste en la inyección de un fármaco fotosensible y su posterior activación, aplicando una luz especial (láser no térmico) durante 83 segundos sobre la zona que queremos tratar.

## **PATOLOGIAS INDUCIDAS POR LA LUZ**

La luz ultravioleta puede causar lesiones, especialmente en la superficie ocular. Fundamentalmente queratitis, de aparición rápida (pocas horas después de la exposición) y muy dolorosas, tanto si es de origen natural, como ocurre en la exposición al sol en montañas nevadas, como de de origen artificial, como sucede en la soldadura.

Un fascinante fenómeno de la naturaleza, los eclipses del sol, pueden dar lugar, si los observamos sin protección, a lesiones graves e irreversibles en la retina. En este caso, los medios refractivos del ojo hacen converger los rayos directamente sobre la fovea, concentrando energía en muy poca superficie y ocasionando una quemadura en la zona más noble y precisa de la retina. Similares lesiones se pueden producir al mirar fuentes de láser.

Existen también lesiones oculares iatrógenas, que suceden en la aplicación de tratamientos con fuentes de luz. Por ejemplo, las hemorragias intraoculares, los fototraumatismo maculares en cirugía de catarata, lesiones en iris, “Pucker macular” e incluso desprendimientos de la retina.

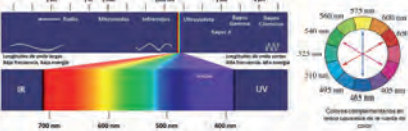


# BASES FÍSICO QUÍMICAS DE LA COLORACIÓN

ROSARIO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ  
*Real Academia Sevillana de Ciencias*

**1. ¿Qué hace que un compuesto aparezca como coloreado?**  
**Interacción de la energía electromagnética con la materia.**


**El espectro electromagnético**  
✓ **Luz visible:** Mezcla de todos los colores del espectro visible ( $\lambda: 380 \text{ a } 760 \text{ nm}$ )  
✓ **Objeto coloreado:** Debe absorber la longitud de onda de la luz en este rango  
✓ **Se observa el color complementario**  
✓  $E = h \cdot \nu$  ( $h$  = constante de Planck);  $\nu = E/h$ ;  $c = \lambda \cdot \nu$  ( $c$  = velocidad de la luz);  $\lambda = hc/E$



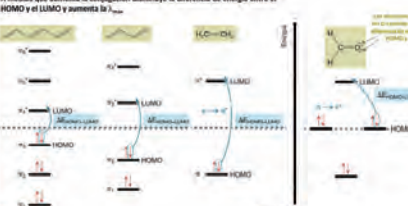
**2. ¿Qué tienen en común los compuestos presentes en tomates, zanahorios y yemas de huevo y que son responsables de su color? (Tiene muchos dobles enlaces)**

**Carotenos (grupo de 11 enlaces / conjugados)**  
**Luteína (grupo de 11 enlaces / conjugados)**  
**Retinol (grupo de 11 enlaces / conjugados)**

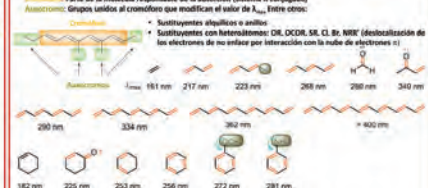
**3. Frecuencia de la radiación y energía**  
Pasa del estado fundamental al estado excitado por la transición de un electrón desde el orbital molecular ocupado de más alta energía (HOMO) hasta el orbital molecular no ocupado de más baja energía (LUMO) por absorción de un fotón de la frecuencia correspondiente a la diferencia de energía entre ambos orbitales:  
 $\nu = \Delta E / h$




**4. ¿Por qué la conjugación permite la absorción de la luz visible?**  
A medida que aumenta la conjugación disminuye la diferencia de energía entre el HOMO y el LUMO y aumenta  $\lambda_{max}$ .



**5. Factores que modifican la longitud de onda de la absorción y por tanto el color**  
**Conjugación:** Parte de la molécula responsable de la absorción (sistema  $\pi$  conjugado)  
**Asimétrico:** Grupos unidos al cromóforo que modifican el valor de  $\lambda_{max}$ . Entre otros:  
• Sustituyentes auxiliares o auxiliares  
• Sustituyentes con heteroátomos: OH, OCH<sub>3</sub>, SR, Cl, Br, NH<sub>2</sub> (deslocalización de los electrones de no enlace por interacción con la nube de electrones  $\pi$ )

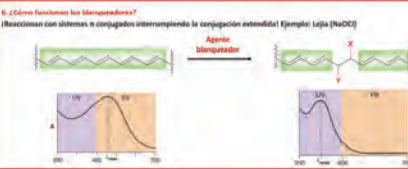


**Influencia del pH. Ejemplo: Clorofila (estructura base de antocianinas)**



**6. ¿Cómo funcionan los Manzoparedones?**  
(Reaccionan con átomos  $\pi$  conjugados interrumpiendo la conjugación extendida). Ejemplo: Lapa (NaOCl)

**Agente Manzoparedor** → **Manzoparedor**

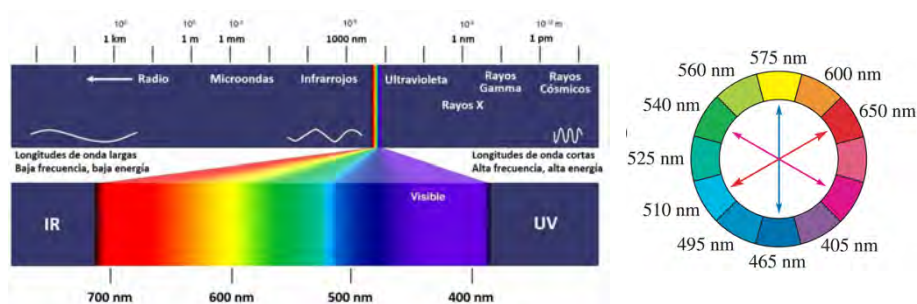




# BASES FÍSICO QUÍMICAS DE LA COLORACIÓN

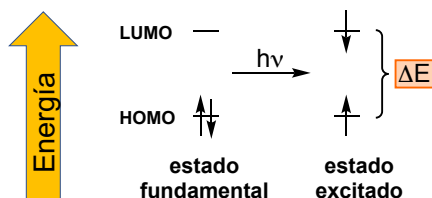
ROSARIO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ  
*Real Academia Sevillana de Ciencias*

¿Qué hace que un compuesto aparezca como coloreado? La respuesta a esta pregunta radica en la forma en que la energía electromagnética interactúa con la materia. Para que una molécula sea coloreada tiene que absorber luz de longitud de onda en la región visible del espectro (380-760 nm) (figura 1), lo que no ocurre en la mayoría de los compuestos orgánicos simples con pocos enlaces múltiples y pocos grupos funcionales.



**Fig. 1. Izquierda, espectro electromagnético. Derecha, rueda de color**

La configuración electrónica normal de una molécula se conoce como su estado fundamental. En ella todos los electrones están en los orbitales moleculares de menor energía. Cuando una molécula absorbe la luz de una longitud de onda adecuada y un electrón es promovido a un orbital molecular de mayor energía, la molécula pasa a un estado excitado. Los electrones del estado fundamental de una molécula se pueden promover a los estados excitados a través de la absorción de luz



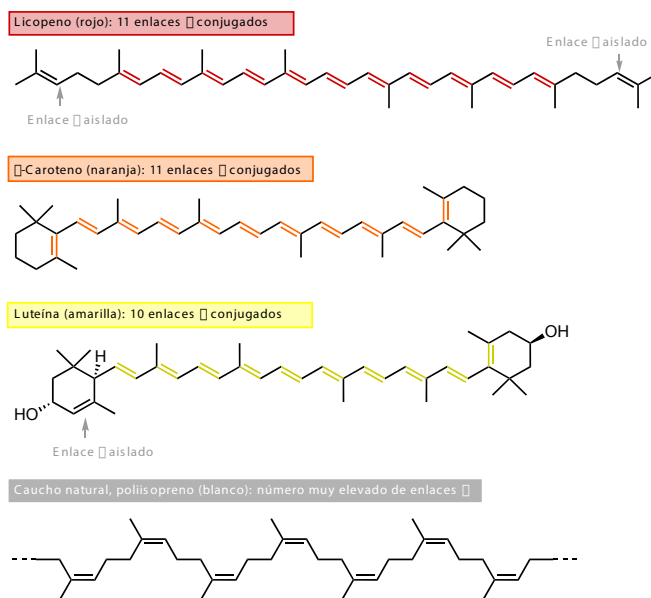
**Fig. 2. Frecuencia de la radiación y energía.**

de frecuencia  $\nu = \Delta E / h$ , donde  $\Delta E$  es la diferencia de energía entre el estado fundamental y el estado excitado,  $h$  es la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$ ) y  $\nu$  es la frecuencia (en  $\text{m}^{-1}$ ) (figura 2). Por absorción de la radiación de una energía adecuada un

electrón pasa del orbital molecular ocupado más alto (HOMO) hasta el orbital molecular desocupado más bajo (LUMO). La relación entre la frecuencia y la longitud de onda  $\lambda$  de la radiación absorbida viene dada por la expresión  $c = \nu \lambda$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\lambda$  es la longitud de onda, y por tanto  $\lambda = hc / \Delta E$ . Así, cuanto menor sea la diferencia de energía  $\Delta E$  entre el HOMO y el LUMO mayor será la longitud de onda de la radiación necesaria para la transición del electrón entre ambos orbitales moleculares.

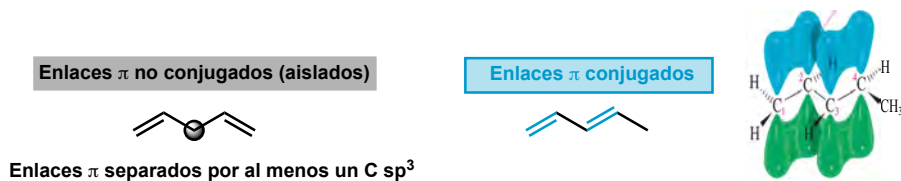
¿Por qué la mayoría de las moléculas que contienen solo enlaces simples son incoloras? La mayoría de los enlaces simples (es decir,  $\sigma$ ) como C-C, C-H, O-H y C-O tienen valores de  $\Delta E$  que corresponden a la luz en la parte UV del espectro. Nos parecen incoloros porque la luz en la región visible simplemente no tiene suficiente energía para excitar sus electrones de enlace a un estado excitado. Los enlaces  $\pi$  absorben en longitudes de onda más largas. Las sustancias que no absorben la luz visible aparecen como blancas, y las que absorben todas las frecuencias de la luz visible aparecen negras. Cuando se absorbe la luz de un determinado color se observa el color complementario. Una herramienta común para visualizar este fenómeno es la rueda de colores que coloca colores complementarios en lados opuestos (figura 1).

Pero ¿por qué los tomates son rojos? ¿por qué las zanahorias son naranjas? ¿por qué las yemas de huevo son amarillas? ¿Qué tienen estas moléculas en común? Tienen muchos dobles enlaces, pero esto no es suficiente. Por ejemplo, el caucho natural tiene muchos enlaces dobles y sin embargo es blanco (figura 3).



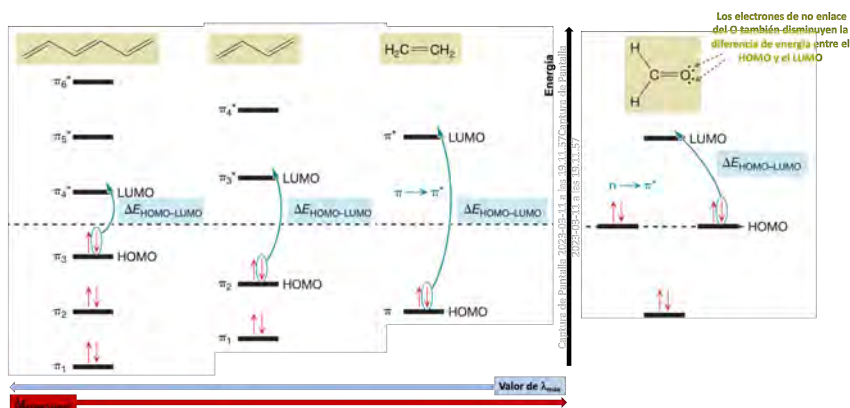
**Fig. 3. Estructura molecular de tres carotenoides y del caucho.**

Hay algo especial en la manera en la que los enlaces múltiples están dispuestos en el licopeno,  $\beta$ -caroteno y luteína, responsables de los colores observados en tomates, zanahorias y yema de huevo, y es que los enlaces dobles están conjugados. En los sistemas conjugados hay dobles enlaces adyacentes separados por un enlace simple. Esto significa que hay carbonos contiguos con hibridación  $sp^2$  cuyos orbitales p libres pueden alinearse para formar un sistema  $\pi$  extendido, que lo que estabiliza al sistema. En los sistemas con dobles enlaces aislados hay al menos un átomo de carbono con hibridación  $sp^3$  que impide esta deslocalización electrónica, tratándose por tanto de enlaces  $\pi$  aislados (figura 4).



**Fig. 4. Los dobles enlaces deben estar conjugados**

El licopeno ( $\lambda_{\max}$  471 nm) y el  $\beta$ -caroteno ( $\lambda_{\max}$  452 nm) tienen cada uno un sistema con 11 enlaces  $\pi$  conjugados (el licopeno tiene también 2 enlaces  $\pi$  aislados) y la luteína ( $\lambda_{\max}$  445 nm) tiene 10 enlaces  $\pi$  conjugados (con un enlace  $\pi$  aislado) y de ahí su coloración. Sin embargo, el latex tiene todos los enlaces aislados, y por ello no presenta coloración. Pero, ¿cómo afecta la conjugación de los enlaces  $\pi$  a la  $\lambda_{\max}$ ? A medida que aumenta el número de enlaces  $\pi$  conjugados también aumenta  $\lambda_{\max}$  debido a que a medida que aumenta la conjugación disminuye la diferencia de energía ( $\Delta E$ ) entre el HOMO y el LUMO, acercándose  $\lambda_{\max}$  cada vez más a la región visible del espectro electromagnético (figura 5). Por otra parte, las moléculas con un enlace C=O tienden a absorber en longitudes de onda más largas que las moléculas análogas con solo enlaces C=C.

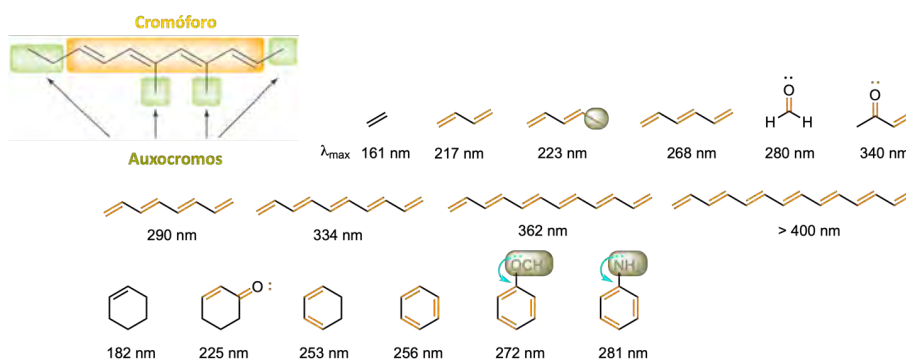


**Fig. 5. Con el aumento de la conjugación, disminuye la diferencia de energía HOMO y LUMO.**

Con las moléculas que tienen ocho o más enlaces  $\pi$  conjugados, la absorción cambia de la región UV a la región visible y el compuesto adquiere el color de esas longitudes de onda de luz visible que no absorbe.

Pero el valor de  $\lambda_{\max}$  no es solo función del número de enlaces  $\pi$  conjugados, ya que si fuese así el licopeno (11 enlaces  $\pi$  conjugados) y el  $\beta$ -caroteno (también con 11 enlaces  $\pi$  conjugados) tendrían exactamente el mismo color. En realidad, el sistema  $\pi$  conjugado es el cromóforo responsable del color, pero  $\lambda_{\max}$  se ve también modificada por los auxocromos, sustituyentes unidos al cromóforo, como los grupos

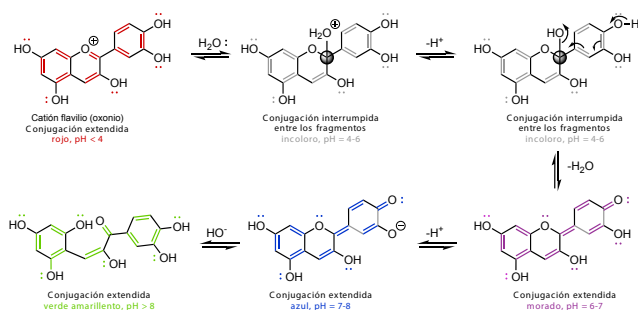
alquilo, anillos endo/exocíclicos, o heteroátomos (OR, OCOR, SR, Cl, Br, NRR'), que por compartición de los electrones de no enlace contribuyen a la conjugación y a la deslocalización electrónica del sistema (figura 6).



**Fig. 6. Influencia de los auxocromos en la coloración.**

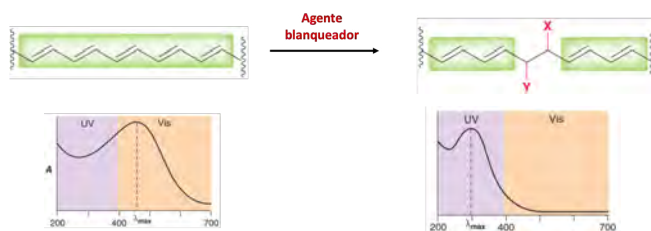
Otro factor que puede afectar a la coloración de un compuesto es el valor del pH del medio. Un ejemplo claro lo constituyen las antocianinas, pigmentos naturales que se encuentran en prácticamente todos los tejidos vegetales. Desde el punto de vista químico, las antocianinas son glicósidos de las antocianidinas, que son compuestos polifenólicos derivados del catión flavilio y pertenecen a una clase superior de moléculas llamadas flavonoides. Las antocianinas pueden cambiar de color en función del pH, presentando distintos colores como consecuencia de las transformaciones químicas que sufren en función de la acidez o basicidad del medio, que modifican el grado de conjugación de los sistemas. En la figura 7 se representan las posibles estructuras de la una antocianididana, la cianidina. A pH ácido ( $\text{pH} < 4$ ) presenta una estructura de tipo ión oxonio (catión flavilio) y color rojo como consecuencia de la conjugación extendida entre los dos fragmentos aromáticos, lo que conlleva la absorción de luz visible. A pH en torno a 4-5 sufre un ataque nucleofílico del agua en el carbono 2, lo que supone la pérdida de la conjugación entre el fragmento difenólico y el resto de la molécula, por lo que el compuesto deja de absorber en el visible y aparece como incoloro. Por encima de pH 5 la pérdida de una molécula

de agua genera estructuras neutras o aniónicas en las que existe una fuerte conjugación, y los compuestos presentan colores intensos.



**Fig. 7. Influencia del pH en la coloración. Ejemplo de la cianidina.**

Considerando el origen del color de los compuestos orgánicos, es posible explicar cómo funcionan los blanqueadores. La mayoría de ellos reaccionan con los sistemas  $\pi$  conjugados interrumpiendo la conjugación extendida (figura 8). De esta manera el sistema que previamente absorbía la luz visible y presentaba color, queda convertido en otro sistema  $\pi$  con menor o nula conjugación que absorbe solo la luz UV y por tanto no es coloreado. Hay que destacar que no es necesario que el blanqueador rompa todos los enlaces  $\pi$ , ya que eliminar solo algunos es suficiente para romper la conjugación responsable del color.



**Fig. 8. Rotura de la conjugación por un blanqueador.**

Un ejemplo de blanqueador es la lejía doméstica, disolución acuosa de NaOCl. Cuando la lejía blanquea una mancha en realidad ésta no ha desaparecido, sino que se ha alterado químicamente, por lo que no se puede ver. Sin embargo, si la prenda se coloca bajo una lámpara con luz UV se podría llegar a detectar su presencia.




# LA LUZ Y LA REPRODUCCION DE LAS PLANTAS CON FLORES. LOS COLORES DE LAS FLORES Y DE LOS FRUTOS

BENITO VALDÉS CASTRILLÓN

Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla,  
e Hispanoamericana de Farmacia

**COLORACIÓN DEBIDA A LA CLOROFILA**  
Muy rara en flores, es más común en frutos



Fruito de pinófeno (*Pinus bourgeana*)

**CAROTENOIDES**  
Producen colores rojos, rosados, anaranjados o amarillos

En la caléndula (*Calendula arvensis*) la coloración de los capítulos se debe a la flavoxantina



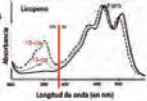



Foto Eric Martí

El licopeno da color a los tomates





**PIGMENTOS QUINÓNICOS**  
Los capítulos del cártamo (*Carthamus tinctorius*) deben su coloración a la cartamina

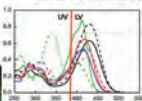
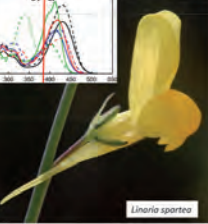


**BETALAINAS**  
Producen los colores de la mayoría de las Cariofitales

Chumbera (*Suaeda frutescens*)



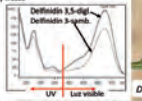
**FLAVONAS, FLAVONOIDES, AURONAS Y CHALCONAS**  
Chalconas y auronas absorben en el ultravioleta y visible de onda corta. Producen colores amarillos y rojos.


*Linaria spartea*

**ANTOCIANINAS**  
Producen las coloraciones azules, azul-violeta, malva, púrpuras, rosadas y rojas de la mayoría de flores y frutos

Definido 3,5-dig  
Definido 3-gmd

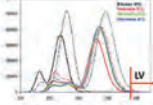



UV | Luz visible



*Delphinium gracile*


**FLAVONAS, FLAVONOIDES, AURONAS Y CHALCONAS**  
Flavonas y flavonoides absorben en el ultravioleta y reflejan toda la luz visible.

*Calystegia sepium*


**ANTOCIANINAS**  
690-740 µg/gr | 450-470 µg/gr

Cianidina




*Zarzamora (Rubus ulmifolius)*

**ANTOCIANINAS**  
Malvidina en *Althaea officinalis*




*Althaea officinalis*


**GUÍAS NECTARÍFERAS**  
Dirigen a los polinizadores hacia el centro de la flor




*Lavatera triloba*



*Liriodenaria*




*Lathyrus clymenum*



*Liriodenaria*

Flavonas  
Flavonoides  
Auronas  
Antocianinas

**COLORES ESTRUCTURALES**



El color azul metálico de los frutos del durillo (*Viburnum tinus*) se produce por refracción de la luz debida a la estructura de los paredes de las células epidérmicas



# LA LUZ Y LA REPRODUCCION DE LAS PLANTAS CON FLORES. LOS COLORES DE LAS FLORES Y DE LOS FRUTOS

BENITO VALDÉS CASTRILLÓN

*Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla,  
e Hispanoamericana de Farmacia*

## LA REPRODUCCIÓN EN LAS PLANTAS CON FLORES O ANGIOSPERMAS

**COMO EN EL CASO DE LOS ANIMALES**, la reproducción es el proceso biológico más importante de las plantas.

Si las flores de las Angiospermas son hermafroditas, que es la situación más generalizada, están formadas en la mayoría de los casos por cuatro tipos de piezas, que desde las más externas a las más internas son: sépalos, que conforman el cáliz, pétalos, que constituyen la corola, estambres, que son los órganos reproductores masculinos, y carpelos, que son los órganos reproductores femeninos. Los carpelos encierran óvulos (primordios seminales), en los que se encuentran los gametos femeninos. Los estambres producen polen, que cuando es transportado hasta los carpelos (polinización), germina formando un tubo polínico por el que los gametos masculinos llegan hasta el primordio seminal produciéndose la fecundación, esto es, la fusión de un gameto femenino y uno masculino.

Las flores de casi el 90% de las Angiospermas son polinizadas por los animales. En las regiones templadas los responsables de la polinización son principalmente los insectos (entomogamia). Pero en otras regiones, particularmente en las tropicales, intervienen también las aves (ornitogamia), los mamíferos, sobre todo los murciélagos (quiropterogamia), y, principalmente en las islas oceánicas, los reptiles (saurogamia).

Tras la polinización, la fecundación desencadena una serie de procesos biológicos que conducen a la transformación de los óvulos en semillas y de los carpelos en frutos. Estos son muy diversos, en función de los distintos mecanismos de dispersión de sus semillas. En los carnosos, las semillas están rodeadas de una pulpa comestible, que es la recompensa que ofrecen a los animales frugívoros dispersores de las semillas (dispersión endozoica en este caso), que son fundamentalmente las aves y los mamíferos.

### **PAPEL DE LA LUZ EN LA POLINIZACIÓN DE LAS FLORES Y DISPERSIÓN DE LAS SEMILLAS**

Para atraer a los animales polinizadores o responsables de la dispersión endozoica de las semillas, las flores y los frutos están más o menos vistosamente coloreados. Sus colores se deben fundamentalmente a la acumulación de varios tipos de pigmentos de base molecular muy diversa, pero que tienen en común el presentar en sus moléculas sistemas conjugados, con los átomos de carbono unidos por enlaces simples y dobles alternados, con posibilidad de formar estructuras resonantes, por lo que absorben una parte del espectro visible, del ultravioleta, o de ambos, y reflejan el resto de la radiación produciendo los correspondientes colores, de los que el ojo humano sólo percibe los reflejados en la banda de la luz visible (380-760 nm), mientras que los insectos y las aves perciben también los reflejados en la banda del ultravioleta (100-380 nm) al disponer de fotorreceptores para esta banda de radiación. Están asociados a las membranas lipoproteicas de los cromatóforos celulares cuando son liposolubles (clorofilas y carotenoides), o disueltos en las vacuolas de las células cuando son hidrosolubles, como es el caso de la mayoría de los pigmentos florales o de los frutos (pigmentos quinónicos, betalaínas y flavonoides).

Pero hay también colores estructurales, que se producen por efecto de la refracción de la luz, debida a su interacción con moléculas o nanoestructuras de los órganos coloreados. Son colores metálicos brillantes, en general con iridiscencia. Frecuentes en los animales,

particularmente en los insectos, son muy raros en plantas (Sun & al., 2013); los frutos azul metálico de los durillos (*Viburnum tinus*), son uno de estos raros ejemplos.

## LOS COLORES DE LAS FLORES Y DE LOS FRUTOS

La clorofila b, que da color a todos los órganos aéreos de las plantas verdes, apenas contribuye a la coloración de las flores, aunque es más frecuente en los frutos.

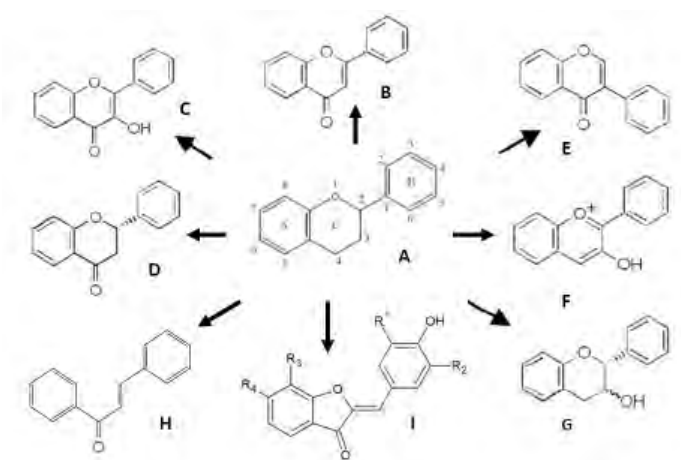
Los carotenoides son cadenas de hidrocarburos insaturados. Se conocen más de 600 (Grotewold, 2006), 40 de los cuales dan coloración a las flores y frutos de numerosas especies. De ellos, los carotenos producen colores rojos, rosados o anaranjados, y las xantofilas amarillos o violeta. Son las xantofilas, por ejemplo, las responsables del color amarillo de las flores de numerosas especies, sobre todo de la familia Compuestas.

Los pigmentos quinónicos proporcionan coloraciones amarillas, anaranjadas o rojizas a las flores de algunas compuestas, como las del cártamo (*Carthamus tinctorius*), que acumulan cartamina y otros pigmentos quinónicos. Algunos de sus derivados absorben luz en el infrarrojo.

Mayor importancia tienen las betalainas, pigmentos nitrogenados derivados del ácido betalámico. Proporcionan colores rojizos, rosados, anaranjados, púrpura o violeta (betacianinas), o amarillos (betaxantinas) a flores y frutos, e incluso órganos subterráneos, de las familias que forman el orden Cariofilales (salvo en las familias Cariofiláceas y Molugináceas), entre las que se encuentran las Nictagináceas, a las que pertenecen las buganvillas y las Cactáceas, a la que pertenecen unas 2.000 especies, que, salvo una, son endemismos americanos. Las Betacianinas presentan el máximo de absorción de la luz hacia los 540 nm; las betaxantinas, hacia los 480 (Marañón-Ruiz & al., 2011).

Pero son los pigmentos flavonoides los más importantes en lo que a su contribución a la coloración de flores y frutos se refiere. Se conocen más de 8.000 tipos (Iwashina, 2015), de los que entre 400 y 500 corresponden a las antocianinas (Andersen & Markham, 2006). Derivados del ión flavilio, están formados por dos anillos aromáticos

(A y B) unidos por una cadena de tres átomos de carbono que puede formar, o no, un tercer anillo heterocíclico (C). Como en los demás pigmentos, los átomos de su molécula están unidos por enlaces sencillos y dobles alternados y conjugados, por lo que pueden absorber parte de la radiación luminosa o ultravioleta, o de ambas, mostrando sus espectros de absorción dos máximos, uno a menor longitud de onda, del que es responsable el anillo A (porción benzoílo de la molécula), y otro a mayor



**Fig. 1. Estructuras del ion flavilio (A) y de sus pigmentos derivados: B, flavonas; C, flavonoles; D, flavononas; E, isoflavonas; F, antocianinas; G, flavanos; H, chalconas; I, auronas.**

longitud, producido por el anillo B (porción cinamoílo) (Monedero, 2016). Se encuentran en estado natural en forma de derivados hidroxilados, metoxilados o glicosilados. Corresponden principalmente a ocho tipos: flavonas, flavonoles, antocianinas, isoflavonas, flavononas, flavanos, chalconas y auronas (fig. 1).

En las flavonas, flavonoles e isoflavonas, el anillo C presenta un enlace insaturado entre las posiciones 2 y 3. Su espectro de absorción tiene sus dos máximos en la banda del ultravioleta. Al no absorber en la banda del espectro visible, reflejan toda la luz, por lo que producen coloraciones blancas, cremosas o marfileñas.

Las antocianinas, que son responsables de las tonalidades azules, azul-violeta, malva, purpúreas, anaranjadas, rosadas y rojas de la mayoría

de las flores, se caracterizan por la presencia de un catión pirilo en el anillo C. Son inestables, y su coloración se modifica con el pH del medio: son más azuladas en medio básico y más rojizas en medio ácido. Su espectro de absorción presenta un máximo en la banda del ultravioleta y otro en la visible. Los más importantes, de los que derivan todos los demás, son la cianidina, de color rojo, que se encuentra en el 69% de los frutos y en el 50% de las flores de este color, seguido de la delphinidina, de color azul, y de la pelargonidina, de color rojo-anaranjado (Harborne, 1963). Les siguen en importancia la peonidina, derivada de la cianidina, y la petunidina y malvidina, derivadas de la delphinidina (Zhao & Tao, 2015).

En las flavononas y flavanos se inhibe la resonancia, ya que los carbonos 2 y 3 del anillo heterocíclico están unidos por un enlace sencillo en lugar de uno doble, por lo que no contribuyen a proporcionar coloración a las flores.

Las chalconas, en lugar del anillo heterocíclico C, tienen una cadena lineal insaturada que conecta los anillos A y B. Su espectro de absorción presenta un máximo en la banda de la luz visible, desde el violeta hasta el verde, y otro en la banda del ultravioleta. Las auronas tienen una estructura similar a las chalconas, con la diferencia que en lugar de la cadena lineal presentan un anillo de furano condensado con el anillo bencénico A. Como las chalconas, absorben en el ultravioleta y en el visible de onda corta. Tanto chalconas como auronas son responsables de los colores amarillos y anaranjados de muchas flores.

En las flores hay frecuentemente copigmentación entre pigmentos de un mismo grupo. Pero es más común que la modificación del color se deba, por ejemplo, a copigmentación entre flavonoides y otros pigmentos o con otros compuestos fenólicos, como ácidos cinámicos o taninos (Tuominen & al. 2015), o a su quelación con hierro, magnesio o molibdeno (Harborne, 1963).

## GUÍAS NECTARÍFERAS

Una vez en contacto con la flor, el agente polinizador es dirigido hacia su centro, donde se encuentran los órganos reproductores,

mediante señales visuales: las guías nectaríferas. Son líneas, manchas, o bandas de pigmentación diferente a la del resto de la corola, o debidas a la acumulación de mayor cantidad de pigmentos a lo largo de los nervios de los pétalos. El ojo humano las percibe cuando los pigmentos responsables de estas guías absorben en la banda de la luz visible; pero no cuando lo hacen en la banda del ultravioleta, como ocurre en la mayoría de los casos, y que sí perciben los insectos y las aves, que son los principales polinizadores de las flores de la Angiospermas.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSEN, O.M. & K.R. MARKHAM (eds.) (2006). *Flavonoids. Biochemistry and Applications*. Boca Raton, C. R. C. Press.
- GROTEWOLD, E. (2006). The genetics and biochemistry of floral pigments. *Ann. Rev. Pl. Biol.* **57**: 761-780.
- HARBORNE, J.B. (1963). Distribution of anthocyanins in higher plants. En T. SWAIN (ed.) *Chemical plant taxonomy*: 359-388. London & New York, Academic Press.
- IWASHINA, T. (2015). Contribution to flower colors of flavonoids including anthocyanidins: A review. *Nat. Prod. Commun.* **10(3)**: 529-544.
- MARAÑÓN-RUIZ, V.F., L. DEL C. RIZO DE LA TORRE & R. CHIU-ZARATE (2011). Caracterización de las propiedades ópticas de Betacianinas y Betaxantinas por espectroscopia UV-Vis y barrido en Z. *Superf. Vacío* 24(4): 113-120.
- MONEDERO, J.M. (2016). *Identificación y caracterización de flavonoides por espectrometría de masas en melazas residuales de un ingenio azucarero*. Tesis de Grado. Universidad ICESI, Cali, Colombia.
- SUN, J., B. BHUSHAN & J. TONG (2013). Structural coloration in nature. *Royal Soc. Chem. Adv.* **7**: 3: 14862-14889.
- TUOMINEN, A., J. SINKKONEN, M. KARONEN & J.-P. SALMINEN (2015). Silylated, acetylglucosylated hydrolysable tannins from the petals of *Geranium sylvaticum* show co-pigment effect. *Phytochemistry* **115**: 239-251.
- ZHAO, D. & J. TAO (2015). Recent advances on the development and regulation of flower color in ornamental plants. *Front. Pl. Sci.*, Art. 261. Doi:10.3389/fpls.2015.



# LOS ANIMALES Y LA LUZ. LA PERCEPCIÓN DEL COLOR EN LA NATURALEZA

PEDRO D. JORDANO BARBUDO

*Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Ciencias Exactas,  
Físicas y Naturales de España*

### El espectro visible

Los colores en los que vemos un objeto no sólo dependen de la composición espectral de la luz reflejada, también representan una interpretación de nuestros ojos y de nuestro sistema visual tricromático. Pero ¿cómo ven el mundo los animales de otras especies? No todas ven colores, pero bastantes ven muchos más que los humanos.



### Receptores visuales en animales

El color se recibe por medio de receptores oculares en la retina, los conos (de hasta cuatro tipos diferentes, L, S, y M y variantes de éstos) y los bastones (que codifican el gris). Diferentes especies animales, con diferente número de receptores pueden ver distintas longitudes onda.




### Modos de visión del color en animales

La percepción del color en animales es fundamental en sus modos de vida, guiando la selección de alimento, elección de pareja y la percepción del ambiente.

**ULTRAVIOLETIS**  
1 tipo de cono añadido, U  
Colores: 100 Millones  
Aves, abejas, ciertos peces.

**TETRACROMÁTICA**  
4 tipos de conos (L, S, M, U)  
Colores: 100 Millones, UV  
Mayoría de reptiles, aves, anfibios e insectos.

**TRICROMÁTICA**  
3 tipos de conos (L, S, M)  
Colores: 10 Millones  
Primates, marsupiales, algunos insectos (abejas).

**DICROMÁTICA**  
2 tipos de conos (S, M)  
Colores: 40000  
Mayoría de mamíferos, incluidos perros y gatos.



**Los animales y la luz**

**PENTACROMÁTICA**  
5 tipos de conos (L, S, M, U, P)  
Colores: 10 billones  
Algunos insectos y aves (palomas), mariposas Papilio.

**MONOCROMÁTICA**  
1 tipo de cono (M)  
Colores percibidos: 200  
Animales nocturnos y marinos, primates acromáticos.



**VISIÓN HUMANA**  
R+G+B

**VISIÓN ULTRAVIOLETA**  
U

**VISIÓN SIMULADA ABEJAS**  
UV+G+B

**VISIÓN SIMULADA AVES**  
UV+R+G+B



# LOS ANIMALES Y LA LUZ. LA PERCEPCIÓN DEL COLOR EN LA NATURALEZA

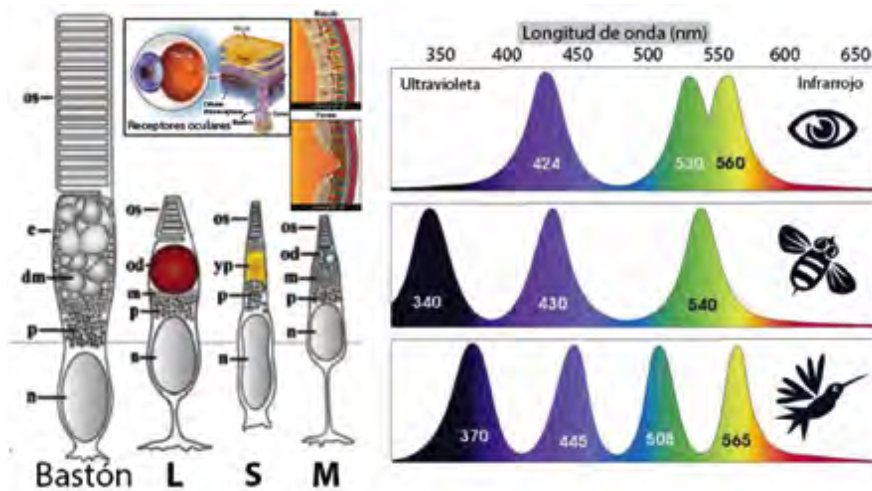
PEDRO D. JORDANO BARBUDO

*Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Ciencias Exactas,  
Físicas y Naturales de España.*

**LA VISIÓN DEL COLOR, UNA CARACTERÍSTICA** de la percepción visual, es una capacidad para percibir las diferencias entre la luz compuesta por diferentes frecuencias, independientemente de su intensidad. Los colores en los que vemos un objeto no sólo dependen de la composición espectral de la luz reflejada, sino que también representan una interpretación de nuestros ojos y de nuestro sistema visual tricromático. Los bastones son células fotorreceptoras de la retina que acompañan a los conos, pero contienen rodopsina, que reacciona a la intensidad de la luz, proporcionando una visión del color en escala de grises.

La visión del color se define convencionalmente como la capacidad de los animales para discriminar de forma fiable entre objetos y luces basándose únicamente en las diferencias en sus propiedades espectrales. Aunque la naturaleza de la visión del color varía ampliamente en diferentes animales, una gran mayoría de los vertebrados poseen cierta visión del color y ese hecho atestigua la importancia adaptativa que tiene esta capacidad como herramienta para analizar el medio ambiente. Además, la visión del color abre la puerta a los mecanismos de coevolución entre especies por medio de señales visuales: por ejemplo, la radiación adaptativa de colores y formas de flores y frutos en las Angiospermas, en relación a sus interacciones mutualistas de polinización y dispersión de semillas. Son procesos en los cuales ha jugado un papel crucial la diversificación química de los pigmentos, tanto en plantas como en animales. La percepción del color comienza con células retinianas especializadas conocidas como conos. Los conos contienen diferentes

formas de opsina, una proteína pigmentada, que tienen diferentes sensibilidades espectrales. Un espectro es una descripción del flujo de fotones (intensidad) en cada longitud de onda,  $\lambda$ , o la probabilidad de reflexión, transmisión o absorción de fotones en cada  $\lambda$ . Para las aves y muchos otros animales, incluidos los humanos, el espectro visible tiene un rango de longitud de onda de  $\approx 380$ -760 nm. Los seres humanos tenemos tres tipos, lo que resulta en una visión tricromática del color. Estos tres tipos de células receptoras especializadas de nuestra retina, los conos (de tres tipos) y los bastones, nos permiten ver un rango de colores que abarca el espectro visible, específicamente desde 380 nm (nanómetros, nm) de longitud de onda a 760 nm. Los conos se etiquetan convencionalmente de acuerdo con el orden de las longitudes de onda de los picos de sus sensibilidades espectrales: tipos corto (S), medio (M) y largo (L), que resultan en una visión del color prácticamente del



**Fig. 1. Células fotorreceptoras especializadas de la retina. Bastones, y tres tipos de conos (L, S y M en aves) son sensibles a diferentes rangos de longitud de onda y codifican los colores. Los bastones son sensibles a variaciones de luminosidad y codifican la escala de grises. Derecha, picos de absorbancia para especies tricromáticas (p. ej., humanos), tricromáticas con visión en el ultravioleta (p. ej. abejas), y tetracromáticas (también con visión en el ultravioleta; p. ej., colibríes).**

modelo RGB (*red, green, blue*) (Fig. 1). Tienen máximos de sensibilidad, respectivamente, a 420-440 nm, 534-555 nm y 564-580 nm.

Pero ¿cómo ven el mundo los animales de otras especies? La mayoría de los mamíferos no tienen tres, sino sólo dos tipos de conos y, por lo tanto, tienen visión del color dicromática. Los mamíferos marinos y algunos mamíferos activos nocturnos, incluso tienen un solo tipo de cono y son completamente daltónicos. Por el contrario, las aves, así como muchos peces y reptiles, ven en el mundo en más tonos de color y con cuatro tipos de conos. Muchos vertebrados, insectos y crustáceos pueden ver no solo el espectro que percibimos, sino también la radiación ultravioleta como luz. Las longitudes de onda más cortas o más largas que el rango 380-760 nm se denominan ultravioletas e infrarrojos, respectivamente. Por lo general, los humanos no pueden ver estas longitudes de onda, pero otros animales sí. Para entender cómo los animales de otras especies ven el mundo, debemos entender sus sistemas visuales.

Muchas especies pueden ver la luz con frecuencias fuera del “espectro visible” humano (Fig. 2). Las abejas y muchos otros insectos pueden detectar la luz ultravioleta, lo que les ayuda a encontrar néctar en las flores. Las especies de plantas que dependen de la polinización de insectos pueden deber el éxito reproductivo a los “colores” y patrones ultravioletas en lugar de a los coloridos que parecen a los humanos. Las aves también pueden ver en el ultravioleta (300-400 nm), y algunas tienen marcas dependientes del sexo en su plumaje que solo son visibles en el rango ultravioleta. Sin embargo, muchos animales que pueden ver en el rango ultravioleta, no pueden ver la luz roja ni ninguna otra longitud de onda rojiza. Por ejemplo, el espectro visible de las abejas termina a unos 590 nm, justo antes de que comiencen las longitudes de onda naranjas.

En los últimos 15 años se ha progresado mucho en catalogar las propiedades espectrales de los fopigmentos de cono que se encuentran en las retinas de varias especies de primates y en dilucidar la relación entre los genes de opsina de cono y sus productos de fopigmentos. Los estudios directos de la visión del color muestran que hay varios patrones modales de visión del color entre los grupos de primates: (i) los monos del Viejo Mundo (Catarrhini), los simios y los humanos tenemos la visión de color tricromática, aunque los dos primeros grupos no



**Fig. 2. Modelos de visión en diferentes grupos animales y, abajo, diferentes formas de visión de un mismo objeto de acuerdo con distintos modelos visuales. La visión tricromática (RGB) muestra tres picos principales de absorbancia que, aproximadamente, corresponden al rojo, verde y azul. A ellos se añade la sensibilidad al ultravioleta.**

parecen propensos a las variaciones polimórficas en la visión del color que son características de las personas (Fig. 2). Muchos otros primates (incluidos los monos del Nuevo Mundo, Platyrrhini) y otros mamíferos son dicromáticos, que es el estado general de visión del color de los mamíferos activos durante el día (p. ej., felinos, caninos, ungulados). En la mayoría de las especies de monos del Nuevo Mundo, los machos son dicromáticos, y alrededor del 60 % de las hembras son tricromáticas, pero los monos búho son monocromáticos de cono, y ambos sexos de los monos aulladores (*Alouatta*) son tricromáticos.

Los mamíferos euterios que no son primates (por ejemplo, perros, y otros mamíferos de granja) generalmente tienen sistemas de percepción de color de dos receptores (dicromáticos) menos efectivos, que distinguen el azul, el verde y el amarillo, pero no pueden distinguir los naranjas y los rojos. Los mamíferos no primates tricromáticos son raros. Los mamíferos marinos, adaptados para la visión con poca luz, tienen un solo tipo de cono y, por lo tanto, son monocromáticos. La mayoría de las especies de vertebrados no mamíferos distinguen diferentes colores al menos tan bien como los humanos, y muchas especies de aves, peces, reptiles y anfibios, y algunos invertebrados, tienen más de tres tipos de conos y probablemente una visión de color superior a la de los humanos, cubriendo sensibilidad a un mayor rango de longitudes onda (Fig. 2).

Otros vertebrados, como los peces tropicales y las aves, a veces tienen sistemas de visión de color más complejos que los humanos; por lo tanto, los muchos colores sutiles que exhiben generalmente sirven como señales directas para otros peces o aves, y no para los mamíferos. En la visión de las aves, la tetracromía se logra a través de hasta cuatro tipos de conos, dependiendo de la especie. Cada cono contiene uno de los cuatro tipos principales de fotorreceptor de cono vertebrado (LWS/MWS, RH2, SWS2 y SWS1) y tiene una gota de aceite de color en su segmento interno. Estas gotas de aceite de colores brillantes dentro de los conos desplazan o reducen la sensibilidad espectral de la célula.

Los reptiles y los anfibios también tienen cuatro tipos de conos (ocasionalmente cinco), y probablemente vean al menos el mismo número de colores que los humanos, o tal vez más. Además, algunos geckos y ranas nocturnos tienen la capacidad de ver el color con poca luz. Muchos invertebrados tienen visión del color. Las abejas y los abejorros tienen una visión de color tricromática que es insensible al rojo pero sensible a los rayos ultravioleta. Una abeja solitaria, *Osmia rufa*, por ejemplo, posee un sistema de color tricromático, que utiliza para buscar polen de las flores. Las mariposas del género *Papilio* poseen seis tipos de fotorreceptores y pueden tener visión pentacromática. El sistema de visión del color más complejo en el reino animal se ha encontrado en estomatópodos (Stomatopoda, como el camarón mantis) que tienen entre 12 y 16 tipos de receptores espectrales que se cree

que funcionan como múltiples unidades dicromáticas. Los camarones mantis pueden percibir longitudes de onda de la luz que van desde el ultravioleta profundo (300 nm) hasta el rojo lejano (720 nm) y la luz polarizada. La especie *Gonodactylus smithii* es el único organismo conocido por detectar simultáneamente los cuatro componentes de polarización lineal y dos circulares, necesarios para medir los cuatro parámetros de Stokes, lo que produce una descripción completa de la polarización. Es el único animal conocido que tiene visión de polarización dinámica, que consigue mediante movimientos oculares rotacionales para maximizar el contraste de polarización entre el objeto enfocado y su fondo.

El objetivo último del estudio de los sentidos no humanos es entender el mundo desde la perspectiva del animal. El color es útil para reconocer objetos y asignarles un valor; por ejemplo, como alimento (flores, frutos carnosos) o en la selección de la pareja y la reproducción. Posiblemente por ello es por lo que el color es tan destacado para nosotros y tan prominente en las señales de comunicación biológica en la naturaleza. A medida que avanzamos más allá de las simples pruebas de la existencia de la visión del color y los argumentos sobre su definición, necesitamos estudiar cómo los animales utilizan la información espectral en contextos naturales y relacionarla con la forma en que perciben y aprenden sobre su mundo.

## BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

- BURTT, E.H.(2018). *The Behavioral Significance of Color*. Routledge, New York.
- ENDLER, J.(1993). The color of light in forests and its implications. *Ecological Monographs* **63**: 1–27.
- HART, N. S.(2001). The visual ecology of avian photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research***20**: 675–703.
- MENZEL, R.(1997). Spectral sensitivity and colour vision in invertebrates. In H. AUTRUM (ed.), *Invertebrate Photoreceptors. (Handbook of Sensory Physiology*, vol. VII/6A): 503-580. Springer, Berlin .
- SCHAEFER, H.M. &RUXTON, G.D.(2011). *Plant–animal communication*. Oxford University Press, Oxford.



# LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. UNA QUÍMICA BRILLANTE

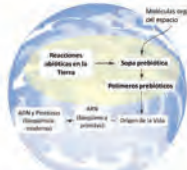
MIGUEL ÁNGEL DE LA ROSA

*Vicepresidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Miembro de la Academia Europaea, MAE (Londres). Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia*

&

IRENE DÍAZ-MORENO

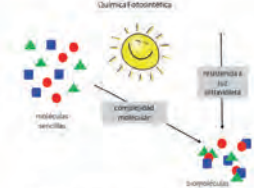
*Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad de Sevilla y CSIC, Sevilla*



**Origen de la vida en la Tierra — ¿Moléculas procedentes del espacio y de las reacciones químicas prebióticas?**


Elementos	Asociación primaria (prebiótica)	Asociación secundaria (actual)
Hidrógeno	Dihidrógeno	Agua
Oxígeno	Agua	Dihidrógeno
Nitrógeno	Amoníaco	Dihidrógeno
Carbono	Metano	CO <sub>2</sub>

**Asociaciones moleculares de los cuatro elementos biológicos primordiales en las atmósferas primitiva y actual.**




**Química fotoquímica**

Un pasado brillante: Química en la Tierra primitiva.



Según la teoría de Oparin y Haldane, la vida surgió en los océanos a partir de moléculas sencillas. En esta primera etapa, las moléculas de la química prebiológica se iban acumulando en las aguas oceánicas hasta formar una especie de sopa primigenia.



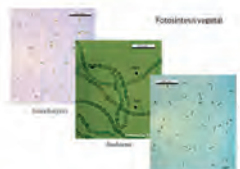
**El experimento de Miller y Urey condujo a la síntesis de moléculas biológicas simulando la Tierra primitiva...**

**ácido cianhídrico** → **Adenina**

Entre la vida y la muerte — El calentamiento prolongado del ácido cianhídrico, compuesto químico letal, da lugar a la síntesis de adenina, constituyente esencial de los ácidos nucleicos, como el ADN, en el que reside la información genética de los seres vivos.

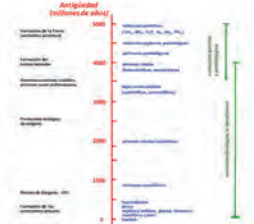
**Características diferenciadoras de los seres vivos**

1. Complejidad y alto grado de organización
2. Función específica, por ejemplo:
  - Ácidos nucleicos: Información genética y Catalisis
  - Proteínas: Estructura y Catalisis
  - Lípidos: Estructura y Reserva energética
  - Carbohidratos: Estructura y Reserva energética
3. Extracción y transformación de materia y energía del entorno
4. Reproducción



**Fotosíntesis vegetal**

Las cianobacterias (o algas verde-azuladas) fueron los organismos fotosintéticos precusores de las plantas, los primeros en utilizar la energía solar para fabricar su propia biomasa y en desprender oxígeno a la atmósfera.



**La aparición y desarrollo de la vida en la Tierra ha corrido siempre en paralelo a su evolución geológica del planeta.**



# LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. UNA QUÍMICA BRILLANTE

MIGUEL ÁNGEL DE LA ROSA

*Vicepresidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Miembro de la Academia Europaea, MAE (Londres). Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia*

&

IRENE DÍAZ-MORENO

*Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad de Sevilla y CSIC, Sevilla*

**EN UN ANTIGUO TEXTO EGIPCIO PUEDE** leerse lo siguiente: “En el principio, este mundo no era nada en absoluto. No existían ni cielo, ni tierra, ni espacio. Ya que no existía, reflexionó: *Seré. Despidió calor*”. El sistema solar, y la Tierra con él, se formó por condensación gravitatoria –la denominada en inglés *accretion theory*– de una nube de polvo relativamente fría hace unos 4600 millones de años. Desde entonces, y pasando por etapas sucesivas de *evolución química, prebiótica y biológica* (o *darwiniana*), ha tenido lugar en nuestro planeta un proceso de organización y complejidad creciente de la materia primitiva que ha permitido la aparición de diferentes formas de vida hasta finalizar en el hombre, la especie más organizada y compleja de cuantas han poblado y pueblan la superficie terrestre.

La principal característica del planeta inicial era la ausencia de oxígeno en la atmósfera, así como una enorme actividad geológica, a saber: erupciones volcánicas, tormentas eléctricas, impactos de meteoritos, desplazamientos tectónicos, etc. En estas condiciones, se formaron las primeras moléculas complejas (*etapa prebiótica*), a partir de moléculas sencillas, en reacciones químicas impulsadas por la energía solar –en particular, por la radiación ultravioleta, más energética

(véase más adelante)– y otras fuentes de energía –sobre todo, térmica y eléctrica–. La energía solar, por tanto, fue espoleta esencial que permitió transformar moléculas simples en otras más complejas, que a su vez sirvieron como unidades estructurales básicas para el desarrollo de la biología y la vida.

Las teorías más acertadas sobre el origen de la vida llegaron en los años veinte del siglo XX, cuando A.I. Oparin y J.B.S. Haldane señalaron, independientemente, que la síntesis de los polímeros biológicos y la aparición de las primeras formas de vida (o proto-células), improbable en las condiciones actuales del planeta, habrían tenido lugar en una *sopa primigenia* constituida por los productos de las reacciones prebióticas, o *química (foto)sintética*.

Un requisito fundamental para poder aceptar científicamente la teoría evolucionista de Oparin y Haldane era la demostración experimental de que las moléculas esenciales de la materia viva



**La aparición de las primeras formas de vida en la Tierra tuvo lugar en una sopa primigenia constituida por moléculas biológicas complejas, en buena parte resultantes de la química fotosintética prebiótica, es decir, de reacciones entre moléculas sencillas impulsadas por la luz del Sol.**

(aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, nucleótidos) pueden sintetizarse efectivamente en el laboratorio, simulando las condiciones de la atmósfera primitiva. El experimento crucial llegó en 1953 de la mano del estudiante de doctorado norteamericano Stanley Miller bajo la dirección de su profesor, el químico Harold Urey, galardonado con el Premio Nobel en 1934 por haber descubierto el agua pesada y el deuterio. En efecto, partiendo de una mezcla de los gases primigenios (metano, amoníaco, vapor de agua e hidrógeno), se consiguió sintetizar –en absoluta ausencia de oxígeno y mediante descargas eléctricas que simulaban los rayos primitivos– varios aminoácidos esenciales en la composición de los seres vivos. El primer paso se había dado, ¡las moléculas biológicas pueden formarse a partir de moléculas de materia inerte mucho más sencillas! Una piedra angular de la química prebiótica, y un ejemplo altamente instructivo de los matices de la (foto)química en los orígenes de la vida, fue la investigación de Ferris, Sánchez y Orgel en la década de 1960 demostrando que el ácido cianhídrico (HCN), bien conocido agente letal para los organismos vivos, puede dar lugar a la síntesis de adenina, que es una base nitrogenada esencial en los ácidos nucleicos, como el ADN y el ARN, por pentamerización térmica y fotoquímica.

Los intentos por comprender la procedencia de los componentes básicos de la vida en la Tierra han llevado al estudio de la reactividad innata de diversas sustancias químicas primarias. La pregunta de cómo las moléculas simples disponibles en la Tierra primordial pudieron haber interactuado para construir sistemas de complejidad creciente se puede responder considerando tanto las fuentes energéticas ambientales en el planeta naciente como las materias primas disponibles capaces de construir escenarios en los que participen las moléculas de interés en la biología moderna. La comprensión de estos escenarios se consigue mejor con un discurso de dos vías, por un lado teniendo en cuenta nuestro conocimiento de la reactividad química y cómo podría conducirnos a la síntesis de biomoléculas esenciales, y por otro concentrándonos en escenarios geoquímicos plausibles y tratar de descubrir nuevas reacciones químicas que nos ayuden a lograr nuestros fines.

Un hallazgo sorprendente que unifica gran parte de la investigación en síntesis prebiótica es el papel de la luz en la promoción de reacciones

difíciles, incluyendo a veces procedimientos inesperados por los cuales biomoléculas importantes son sintetizadas de modo selectivo. La luz es indispensable tanto en el ecosistema biológico moderno como en las emulaciones de laboratorio de los antiguos sistemas químicos abióticos.

La luz solar ha sido reconocida durante mucho tiempo como la principal fuente de energía en nuestro planeta. La cantidad de radiación ultravioleta incidente en la superficie de la joven Tierra habría dependido de su composición atmosférica, tema que es objeto de cierto debate. En ausencia de turbidez, el flujo radiación ultravioleta en la superficie era probablemente varios órdenes de magnitud más alta de lo que es hoy en el rango espectral hasta 200 nm, en buena parte debido a la ausencia de ozono. Luz ultravioleta, relámpagos, vulcanismo e impactos de material extraterrestre fueron frecuentes en las fases tempranas, actuando como fuerzas motrices geofísicas de las reacciones químicas con potencial de generar materia orgánica. En los informes de Miller sobre sus ensayos de descarga eléctrica en atmósfera reductora explícitamente hace constar que consideró la radiación ultravioleta como alternativa a la descarga eléctrica, pero decidió que con esta última sería más fácil probar experimentalmente la generación de materia orgánica cerca de la superficie terrestre, donde podría ocurrir con rapidez su transporte al océano antes de la degradación fotolítica.

Es importante trazar la distinción entre *fotoquímica atmosférica* y *fotoquímica acuosa superficial*. La primera, junto a la química promovida por la descarga eléctrica, el vulcanismo y los impactos de material exterior, habría dado forma al material –estructuralmente simple y volátil– de la atmósfera prebiótica de la Tierra y, consiguientemente, a los océanos, sobre todo por fotólisis del material atmosférico. La segunda, por su parte, ha demostrado tener el potencial suficiente para impulsar el ensamblaje de las materias simples primitivas en sistemas químicos de mayor complejidad de composición y estructural como precursores biológicos. La diferencia crítica es que en la atmósfera la energía de los fotones promueve la descomposición de la materia orgánica, mientras que en el ambiente acuoso, más concentrado, la irradiación puede generar especies energéticas capaces de reaccionar y actuar sobre otras moléculas de sustancias acuosas o sólidas.

El aumento selectivo de complejidad proporcionada por la fotoquímica acuosa superficial es un hecho hoy constatado, pero su ocurrencia en la joven Tierra habría dependido de una amplia variedad de factores ambientales, así como del delicado equilibrio entre síntesis y destrucción fotoquímicas. La determinación del alcance de tal posibilidad ha llevado a muchos descubrimientos en fotoquímica, contribuyendo así a nuestra comprensión de la reactividad fundamental de las moléculas (pre)biológicamente relevantes.

La última década, en concreto, ha sido testigo de notables avances en el descubrimiento de la fotoquímica en transformaciones prebióticamente relevantes y en la síntesis de (proto)moléculas biológicas. Hoy día está ampliamente aceptada la idea de que en el curso de la evolución hacia la vida debió existir una primera etapa en la que ciertos tipos de moléculas orgánicas se irían acumulando en las aguas oceánicas hasta formar una especie de *sopa primigenia*. Algunas de estas moléculas llegarían a ser capaces de sobrevivir mejor formando grupos más o menos complejos que en solitario, es decir, formarían asociaciones moleculares más organizadas y mejor estructuradas. Las agrupaciones resultantes llegarían a adquirir una función específica, tal como una actividad química no conocida hasta entonces o la capacidad de resistir cambios ambientales, e incluso podrían aprender a autorreplicarse. Al final, aparecerían las proteínas estructurales, y las proteínas catalíticas (enzimas), y los lípidos, y los ácidos nucleicos, y los azúcares...

De los cientos de miles de moléculas orgánicas diferentes que se pudieron sintetizar, el número de compuestos básicos que se manejan en la química de los seres vivos es sorprendentemente pequeño. De hecho, todos los organismos presentan una bioquímica similar. El ser humano maneja tan solo unos 120 compuestos, a saber: veinte aminoácidos, cinco bases nucleotídicas, cuatro lípidos, cuatro monosacáridos, una veintena de vitaminas y varias moléculas pequeñas, como son los ácidos orgánicos, los fosfatos y el agua. La *unidad bioquímica* que afecta a la práctica totalidad de los seres vivos es, por tanto, uno de los conceptos biológicos más importantes, y las principales macromoléculas de la materia viva (ácidos nucleicos, proteínas, carbohidratos, lípidos) están compuestas por un número muy reducido de pequeñas moléculas

(nucleótidos, aminoácidos, monosacáridos, ácidos grasos). La naturaleza ha hecho uso de los mismos sillares estructurales para construir la inmensa variedad de sus sistemas bioquímicos y celulares.

Cientos de millones de años después, la radiación procedente del Sol volvió a jugar un papel clave como agente impulsor esencial de la vida en la Tierra cuando las bacterias aprendieron a utilizar la energía de la luz para fabricar su propio material celular, dando así lugar al proceso conocido como *Fotosíntesis*. En un principio, las bacterias fotosintéticas no producían oxígeno, pero al poco aparecieron las cianobacterias –precursoras de las plantas y, en conjunto, del mundo vegetal–, que aprendieron a liberar el oxígeno del agua; la acumulación de oxígeno en la atmósfera a su vez permitió la aparición de la respiración y la vida animal (véase el capítulo siguiente sobre *Fotosíntesis* en este mismo Catálogo).



# LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. FOTOSÍNTESIS, UN RETO PARA EL HOMBRE

MIGUEL ÁNGEL DE LA ROSA

*Vicepresidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Miembro de la Academia Europaea, MAE (Londres). Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia*

&

IRENE DÍAZ-MORENO

*Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad de Sevilla y CSIC, Sevilla*

$-4,6 \cdot 10^9$  Formación de la Tierra  
 $-3,8 \cdot 10^9$  Primeras células vivas. Fotosíntesis oxigénica  
 $-2,4 \cdot 10^9$  La Gran Oxidación  
 $-0,6 \cdot 10^9$  Punto Pasteur (respiración con  $O_2$ )  
 $-0,4 \cdot 10^9$  Punto Berkner-Marshall (vida terrestre)

Cronología evolutiva de la fotosíntesis y la respiración en relación al contenido en oxígeno de la atmósfera.

La fotosíntesis y la respiración conforman el ciclo biogeoquímico de materia y energía entre los reinos vegetal y animal.

PRODUCTOS ORGANICOS:  
 BIOMASA (vegetal, animal, fúngica, bacteriana, etc.)  
 O<sub>2</sub>  
 H<sub>2</sub>O  
 SUSTANCIAS INORGANICAS SIN POTENCIAL QUÍMICO (CO<sub>2</sub>, agua, óxido de carbono, nitrógeno, sulfuro, hierro, etc.)

Gracias a la entrada continua de energía solar, los cloroplastos y los mitocondrios mantienen el equilibrio dinámico y estable de la biosfera.

Características de la radiación solar — La energía de los fotones depende de su longitud de onda.

Estructura molecular de la clorofila a  
 Espectro de absorción de la clorofila a  
 Fotosistema constituido por la cadena de moléculas de clorofila alrededor del centro de reacción.

La energía de los fotones solares es absorbida por la clorofila y utilizada para energizar sus electrones.

FOTOSÍNTESIS

El aparato fotosintético de las células vegetales está constituido por complejos de proteínas anclados en las membranas de los cloroplastos.

Esquema de una célula de plantas en la que se puede apreciar el cloroplasto, con sus membranas tilacooidales.

¡Porque la Naturaleza no tiene precio... y la Humanidad, sí!

Giacomo Ciamician

El italiano G. Ciamician fue el primero en plantar en 1912 sobre la necesidad del tránsito a una economía mundial basada en energías renovables.



## LA LUZ Y EL ORIGEN DE LA VIDA. FOTOSÍNTESIS, UN RETO PARA EL HOMBRE

MIGUEL ÁNGEL DE LA ROSA

*Vicepresidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Miembro de la Academia Europaea, MAE (Londres). Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia*

&

IRENE DÍAZ-MORENO

*Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad de Sevilla y CSIC, Sevilla*

**LA VIDA EN LA TIERRA EMERGIÓ DE LA** *sopa primigenia* (véase el capítulo anterior *La Luz y el Origen de la Vida. Una química brillante* en este mismo Catálogo) cuando moléculas típicamente biológicas, como ácidos nucleicos y proteínas, se encapsularon espontáneamente en gotas lipídicas, o liposomas, aislándose del medio externo y creando en el interior el ambiente adecuado para que tuvieran lugar las reacciones metabólicas iniciales. Los primeros proto-organismos vivos tuvieron que alimentarse y obtener la energía necesaria para su propio crecimiento y desarrollo por *fermentación* (o respiración sin oxígeno) de los compuestos orgánicos sintetizados durante el periodo prebiótico. Pero al empezar a escasear estas sustancias, aquellos tuvieron que evolucionar y aparecieron bacterias capaces de fabricar su propio material aprovechando la energía solar, surgiendo así la *fotosíntesis*, o síntesis de biomoléculas complejas promovida por la luz.

El proceso implicaba la utilización de un pigmento fotoexcitable, como la clorofila, y una fuente donadora de electrones, a saber: hidrógeno molecular ( $H_2$ ), compuestos de azufre ( $H_2S$ ) e incluso compuestos orgánicos para regenerar la clorofila oxidada tras la excitación. Pero nuevamente la continuidad de la vida estaba limitada

por el carácter perecedero de estos compuestos reductores. Así, un avance crucial, aún más importante si cabe que la propia fotosíntesis, fue la aparición de bacterias fotosintéticas con capacidad de usar una sustancia tan abundante y extendida como el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) para reducir la clorofila fotooxidada. Eran las cianobacterias –precursoras de las plantas, incluyendo las algas–, que empezaron a liberar a la atmósfera el oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) desprendido en la oxidación del agua y provocaron el tránsito decisivo hacia la atmósfera oxidante actual. De hecho, el uso del agua y la consiguiente liberación de dióxígeno marcan la evolución desde la *fotosíntesis no-oxigénica* de las bacterias fotosintéticas hacia la *fotosíntesis oxigénica* (generadora de oxígeno) de cianobacterias, microalgas y plantas. La *clorofila*, un compuesto orgánico con magnesio,



**La fotosíntesis consiste en la fabricación de compuestos orgánicos ricos en energía con la luz del Sol, que sigue llegando a la Tierra en cantidades ingentes. El reto para el hombre es aprender a captar, convertir y almacenar la energía solar de manera sostenible y eficaz: ¡Porque la Naturaleza no tiene prisa... y la humanidad, sí! (G. Ciamician, 1912).**

fue la molécula clave, sobre la cual se sustenta la vida del mundo vegetal y por ende de todo el mundo vivo. Lo que hace que la clorofila resulte de tan enorme importancia biológica es su extraordinaria capacidad de excitarse por la luz —es decir, de absorber fotones visibles— y donar los electrones fotoexcitados a otras moléculas, desencadenando así toda una serie de reacciones metabólicas de síntesis de material celular que no pueden tener lugar en la oscuridad.

En esencia, la *fotosíntesis* consiste en la utilización por los sistemas vivos de la energía radiante del Sol para la transformación del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) del aire en carbohidrato, o azúcar, así como del nitrato y sulfato del suelo en amonio y sulfuro, respectivamente. Se trata de un proceso metabólico impulsado por la luz, en el que los electrones necesarios para la asimilación de los citados nutrientes minerales, o sustratos oxidados, son suministrados por el agua. El proceso transcurre en dos etapas, denominadas *fase lumínica* y *fase oscura*. La primera, que es la única realmente impulsada por la luz y, por consiguiente, de naturaleza fotoquímica, tiene la doble función de producir el denominado *poder asimilatorio* —es decir, moléculas con electrones de alta energía (NADPH y ferredoxina) y adenosín-trifosfato (ATP, compuesto considerado la “moneda energética” de la célula viva)—, que será utilizado en la segunda fase. Es en esta primera fase cuando tiene lugar la fotooxidación del agua por la clorofila, con la concomitante liberación de oxígeno, y cuando se produce la captación y conversión de la energía solar en energía química de tipo redox y de enlace. La segunda fase se conoce impropriamente como *fase oscura*, ya que la luz no es necesaria como fuente impulsora pero sí para activar determinadas enzimas, o proteínas catalíticas. La fase oscura comprende toda una serie de reacciones en que las moléculas inorgánicas antes citadas —es decir, los nutrientes minerales de escaso valor energético— son reducidas con los electrones energizados del NADPH y ferredoxina reducida. La fotosíntesis del carbono y la del sulfato, que no la del nitrato, necesita, además del concurso de energía en forma de ATP.

La fotosíntesis transcurre en estructuras membranosas especializadas dentro de orgánulos especialmente diseñados de la célula vegetal. Son los denominados *cloroplastos* de plantas y algas. En realidad,

la unidad estructural mínima de la fotosíntesis es el *tilacoide*, llamado así por tratarse de una vesícula aplanada (del griego *thylakos*, pequeño saco, y *-oide*, forma) que se encuentra en el interior del cloroplasto. Los tilacoides se suelen disponer en apilamientos, como si fueran monedas amontonadas, que reciben el nombre de *grana* (del latín, *granum* en singular).

La producción de oxígeno libre –conocida como la *Gran Oxidación*– determinó el tránsito a una atmósfera oxidante, lo que tendría dos consecuencias importantísimas para la evolución ulterior de vida en el planeta. Por un lado, el oxígeno se iría acumulando progresivamente en la atmósfera y permitiría la formación de la capa de ozono (u ozonósfera) capaz de filtrar las radiaciones ultravioletas antibióticas procedentes del Sol. Los organismos vivos abandonarían las aguas oceánicas en las que hasta entonces se habían desarrollado, aguas que les habían servido de protección frente al efecto destructor de las radiaciones ultravioletas, y pasarían a colonizar la tierra firme. Por otro lado, el oxígeno atmosférico permitiría la aparición de los animales, de nuevas formas de vida totalmente diferentes a las anteriores, capaces de obtener su energía mediante un nuevo proceso de combustión de alimentos (o *respiración* con oxígeno) mucho más eficiente que la fermentación. Al igual que la fotosíntesis, la respiración transcurre en orgánulos membranosos especialmente diseñados de la célula, las llamadas *mitocondrias*.

En la actualidad, la fotosíntesis y la respiración constituyen el ciclo fundamental de energía en la biosfera, o *ciclo bioenergético básico*, pues ambos se complementan y permiten el perfecto equilibrio hoy existente en el planeta entre los reinos vegetal y animal. El establecimiento del ciclo bioenergético y del escudo protector de ozono atmosférico hizo que se disparara la evolución definitiva hacia nuevas formas de vida, tanto animales como vegetales, cada vez más complejas y mejor adaptadas a los distintos hábitats y condiciones, hacia las muchas especies que hoy conocemos y que representan una mínima parte de la infinidad de aquellas que han ido surgiendo en el curso de la evolución biológica. El Cámbrico, en particular, se caracterizó por una explosión evolutiva de vida.

El Sol, fuente inagotable de luz y energía en el mundo vivo, se erige hoy, más que nunca, en el garante central y único del abastecimiento

seguro de recursos energéticos para el progreso continuo y avance de la humanidad. En efecto, los gobernantes de los países de hoy son conscientes de que sus modelos de crecimiento deben contemplar la transición hacia un sistema económico basado en fuentes de energía renovables no contaminantes –con la energía solar como eje central– y abandonar las fuentes tradicionales de energía, como son los combustibles fósiles –en particular, petróleo, carbón y gas natural–. La necesidad del *tránsito energético* se hizo evidente e, incluso, acuciante hace casi medio siglo, cuando en 1973 la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) decidió utilizar el crudo como arma política al incrementar los precios recortando la producción de sus países miembros. El objetivo de la OPEP, controlada por los países árabes, no fue otro que castigar a los países aliados de Israel en la guerra árabe-israelí del Yom Kippur, llamada así por haber empezado el Día de la Expiación, o Yom Kippur, la fiesta más solemne del calendario judío.

La sociedad de entonces se vio sorprendida con mensajes alarmistas que ponían límite temporal cercano a las reservas de petróleo y, en general, de combustibles fósiles. En la actualidad, casi medio siglo después, el agotamiento de las reservas mundiales de petróleo se ve más lejano, pero la necesidad del cambio de política energética permanece. El principal argumento hoy contra el uso extendido de combustibles fósiles es su acción contaminante por emisión a la atmósfera de CO<sub>2</sub> y metales tóxicos resultantes de la combustión. Así pues, la apuesta por fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles se mantiene, aunque la decisión se basa más en razones medioambientales que en el miedo al agotamiento.

El fotoquímico italiano Giacomo Ciamician fue de los primeros en alertar en 1912 sobre la necesidad del tránsito hacia una economía mundial basada en energías renovables. Y fue el primero en proponer el uso de sistemas fotoquímicos artificiales para producir combustibles a partir de la energía solar. Ello haría a la humanidad independiente del carbón y ayudaría a reducir la brecha social entre ricos y pobres. En palabras de Ciamician: “*Porque la naturaleza no tiene prisa... y la humanidad, sí*”.

La energía solar sigue estando hoy en el foco de atención del debate sobre las fuentes principales de energía en el mundo del futuro.

El ciudadano medio contempla el debate con cierto escepticismo –como paciente espectador, aunque sabiéndose actor– y ante las decisiones de sus gobernantes se plantea ansioso la siguiente pregunta: “*Si hacemos virar nuestras economías hacia el uso del sol como fuente principal y casi única de energía, ¿habrá suficiente, a largo plazo, para todo y todos?*” La respuesta es inmediata e inequívoca: “*Sí*”. La energía solar que llega a la biosfera es del orden de  $10^{17}$  vatios (julios por segundo), cantidad que es del orden de diez mil veces superior al consumo energético de toda la humanidad ( $10^{13}$  vatios). Es decir, la población mundial tendría suficiente con la diezmilésima parte de la energía que llega del Sol para satisfacer su demanda. Como referencia podemos decir que el conjunto del reino vegetal en todo el planeta asimila y aprovecha por acción de la fotosíntesis, tanto en los ecosistemas terrestres como acuáticos, una cantidad de energía solar que es diez veces superior ( $10^{14}$  vatios) a la que necesita la humanidad. Y si atendemos a los requerimientos alimentarios de la población humana, su equivalente en energía ( $10^{12}$  vatios) es del orden de diez veces inferior a sus requerimientos energéticos ( $10^{13}$  vatios).

Así pues, la energía solar nos inunda y llega en cantidades ingentes, muy superiores a las que necesitamos, y, por tanto, no debemos alarmarnos por una eventual falta de aprovisionamiento energético; tan solo tenemos que desarrollar sistemas de captación, conversión y almacenamiento de la energía solar que sean eficaces y sostenibles.



# LA LUZ Y EL MUNDO MICROBIANO

ANTONIO VENTOSA UCERO

*Academia Iberoamericana de Farmacia*

&

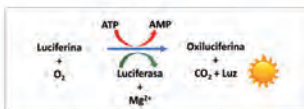
CRISTINA SÁNCHEZ-PORRO ÁLVAREZ

*Departamento de Microbiología y Parasitología, Universidad de Sevilla*

## Microorganismos que emiten luz: Bioluminiscencia



<http://imgsigprodactions.blogspot.com/>



Bacterias como *Vibrio* o *Photobacterium* poseen la enzima luciferasa, que en presencia de oxígeno cataliza la oxidación de la luciferina, emitiendo luz.

## Vida en ausencia de luz

Ecosistemas que no dependen de la fotosíntesis

**Profundidades marinas:** existen microorganismos quimiosintéticos, que son capaces de vivir en el fondo de los océanos gracias a que se alimentan de gases (CO<sub>2</sub>) y moléculas orgánicas que les proporcionan energía.

**Profundidades terrestres:** algunos microorganismos extremófilos pueden vivir en el interior de la corteza terrestre. Obtienen energía para crecer a partir de moléculas orgánicas e inorgánicas. Un ejemplo son los estudios microbiológicos realizando perforaciones a distintas profundidades que se están llevando a cabo en el Río Tinto, en Huelva.

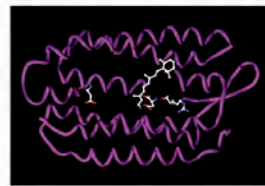
## Microorganismos que obtienen energía a partir de la luz

Además de la fotosíntesis, muchos microorganismos no fotosintéticos obtienen energía a partir de la luz gracias a proteínas denominadas rodopsinas que les permiten moverse, crecer y sobrevivir a falta de nutrientes.



<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asm.20180927>

## Bacteriorrodopsina



Proteína transmembrana de color púrpura de las arqueas halófilas, denominadas haloarqueas, que viven en ambientes hipersalinos, que les permiten usar la energía lumínica para convertirla en energía química.



## Efectos dañinos de la luz sobre los microorganismos



La luz ultravioleta puede causar alteraciones en el ADN de los microorganismos, dando lugar a mutaciones e incluso si la exposición es muy prolongada puede llegar a eliminarlos. Actualmente la luz ultravioleta se utiliza para esterilizar materiales o superficies.



# LA LUZ Y EL MUNDO MICROBIANO

ANTONIO VENTOSA UCERO

*Academia Iberoamericana de Farmacia*

&

CRISTINA SÁNCHEZ-PORRO ÁLVAREZ

*Departamento de Microbiología y Parasitología, Universidad de Sevilla*

**LA MICROBIOLOGÍA ES LA CIENCIA QUE** estudia los seres vivos más pequeños, que no somos capaces de observar a simple vista y que constituyen un amplio conjunto de organismos muy diversos, como son las bacterias y las arqueas, entre los organismos procariotas, y los hongos, algas y protozoos entre los eucariotas. Los primeros habitantes de nuestro planeta Tierra fueron seres microscópicos y se estima que surgieron hace aproximadamente unos 3.500 millones de años. Aunque los primeros microorganismos eran anaerobios y se desarrollaron en ausencia de oxígeno, fueron los primeros seres vivos capaces de obtener energía a partir de la luz solar, mediante un proceso denominado fotosíntesis (véase el capítulo anterior). Ellos fueron los responsables de que se formase la atmósfera, rica en oxígeno.

Aunque la mayoría de nosotros asociamos la fotosíntesis a las plantas, más de la mitad de la fotosíntesis en nuestro planeta se realiza por parte de microorganismos. Además, el sistema de fotosíntesis de las bacterias verdes y púrpuras es diferente al que poseen las plantas y las cianobacterias, ya que son anoxigénicos, no producen oxígeno y el pigmento fotosintético no es la clorofila, sino las bacterioclorofilas.

Además de la fotosíntesis, muchos microorganismos no fotosintéticos utilizan la luz para obtener energía mediante unas proteínas que se denominan rodopsinas. Entre ellas se encuentra la bacteriorrodopsina, que se descubrió hace muchos años en la haloarquea

*Halobacterium salinarum*, que es capaz de crecer en ambientes acuáticos con elevadas concentraciones salinas, como los lagos hipersalinos o las salinas solares. La bacteriorrodopsina es una proteína transmembrana, que se encuentra formando unos parches o estructuras de color púrpura, que ocupan una parte importante de la superficie de la célula (de aquí que se le llame “membrana púrpura”). Así, cuando esta arquea halófila extrema se encuentra en sistemas acuáticos salinos en gran abundancia, les infringe un color púrpura intenso, asociado a su vez al característico color rojo-rosa de salinas y otros hábitats hipersalinos, que es producido por compuestos carotenoides denominados bacteriorruberas. La bacteriorrodopsina actúa como una bomba de protones, utilizando la energía lumínica para transportar protones contra gradiente al medio externo a través de la membrana celular de las haloarqueas. Dicho gradiente de protones se convierte posteriormente en energía química a través de una ATPasa, una enzima que poseen dichas haloarqueas. Actualmente son muchas las aplicaciones y potencialidades de la bacteriorrodopsina, como la mejora de la eficiencia de las celdas solares fotovoltaicas o la obtención de biochips.

Las haloarqueas también poseen otras rodopsinas con diferentes funciones biológicas, como las rodopsinas sensoriales, que utilizan la luz para obtener información acerca del medio ambiente (fototaxis) o la halorrodopsina, bomba de iones cloro activada por la luz, que ha abierto un nuevo campo en la optogenética, para su aplicación en el tratamiento de enfermedades motoras neurodegenerativas.

Por otra parte, estudios recientes han puesto de manifiesto que si bien las cianobacterias y bacterias fotosintéticas son responsables de la fijación del CO<sub>2</sub> y de la formación de oxígeno en sistemas oceánicos, muchas bacterias marinas heterótrofas, que generalmente obtienen energía mediante la degradación de materia orgánica, pueden utilizar la luz como fuente de energía mediante una proteína, la proteorrodopsina, capaz de captar la energía lumínica. Este proceso parece ser mucho más frecuente en ambientes marinos y acuáticos, y permite a dichas bacterias heterótrofas que en condiciones de escasez de nutrientes obtengan energía de la luz, permitiéndoles sobrevivir, crecer y desarrollarse en dichas condiciones adversas. Esta estrategia es bastante frecuente en

bacterias que constituyen una proporción importante de la microbiota de ambientes marinos, como la flavobacteria *Polaribacter* (filo *Bacteroidota*) o la alfa-proteobacteria *Pelagibacter ubique* (filo *Pseudomonadota*).

Algunos microorganismos, y otros seres vivos, son capaces de emitir luz, fenómeno que se conoce como bioluminiscencia. Se trata de una reacción química, debida a la acción de una enzima denominada luciferasa. Esta enzima, en presencia de oxígeno, cataliza la oxidación de una proteína luminiscente, la luciferina, dando lugar a la emisión de luz. Este proceso surgió posiblemente como un mecanismo evolutivo de defensa bacteriana, para evitar el efecto tóxico del oxígeno, cuando dicho gas comenzó a producirse en nuestro planeta por los microorganismos fotosintéticos. Esta capacidad de producir luz les otorga a dichas bacterias ventajas ecológicas importantes, y está ligada a un sistema de comunicación química entre ellas, que se denomina “*quorum sensing*”, pues la producción de luz se origina cuando la densidad celular en un ambiente determinado alcanza un número importante de células bacterianas y mediante sensores adecuados se activan dichos mecanismos de bioluminiscencia. Las bacterias bioluminiscentes se encuentran principalmente en ambientes acuáticos, tales como las profundidades marinas, y entre ellas se encuentran especies de los géneros *Vibrio* o *Photobacterium*, frecuentemente asociadas a la superficie de otros seres marinos, como peces o calamares, estableciendo una simbiosis entre ellos. Las bacterias tienen mayor acceso a los nutrientes y los peces utilizan dichas señales luminosas para evitar depredadores o atraer a sus presas.

En contraste con el importante papel que juegan los microorganismos y de sus actividades metabólicas en diferentes hábitats acuáticos o de la superficie terrestre, existe mucha menos información acerca de la vida en ambientes desprovistos de luz solar. La pregunta, por tanto, es si sería posible la existencia de vida en ausencia de luz. Existen ecosistemas que no dependen de la fotosíntesis y en los cuales se han detectado actividades microbianas, como son las profundidades marinas o terrestres. Pondremos algunos ejemplos de estos hábitats en los que se ha detectado la presencia y crecimiento activo de comunidades de microorganismos en ausencia de luz solar.

En 1977 se descubrieron las fuentes hidrotermales marinas profundas, a más de 2400 metros en el océano Pacífico, y posteriormente en otras dorsales. Dichas fuentes hidrotermales subacuáticas, de las que se ocupa Díaz-del-Río en el capítulo siguiente, son abundantes en nuestro planeta y suelen originar chimeneas, que se forman como consecuencia del depósito de los minerales disueltos en los fluidos que emiten, fundamentalmente sulfuros metálicos. Las zonas que rodean dichas fuentes hidrotermales son biológicamente muy productivas y están constituidas por comunidades que se nutren de los compuestos químicos que emiten. Algunos microorganismos extremófilos, en concreto procariotas autótrofos, utilizan compuestos de azufre, como el sulfuro de hidrógeno, para producir materia orgánica. Un ejemplo de los microorganismos que viven en estos ambientes son las arqueas y bacterias quimiosintéticas, que crecen en simbiosis con invertebrados marinos, como el gusano gigante *Riftia pachyptila* (que puede llegar a medir 2,5 m), un vestimentífero que posee un tubo gigante que alberga miles de millones de dichos procariotas que oxidan el azufre para obtener energía y que les aportan los nutrientes necesarios para alimentarse.

Los microorganismos quimiosintéticos o quimioautótrofos son procariotas que sintetizan materia orgánica a partir de materia inorgánica; utilizan el  $\text{CO}_2$  como principal fuente de carbono, pero en vez de usar la luz como fuente de energía, ésta la obtienen por oxidación de compuestos inorgánicos reducidos. Entre las bacterias quimiosintéticas o quimiolitotrofas se encuentran grupos de bacterias que oxidan el hierro ferroso a férrico, las que oxidan el azufre o compuestos reducidos de azufre, transformando el sulfuro de hidrógeno en sulfato, o las bacterias del nitrógeno que oxidan compuestos reducidos de nitrógeno, como *Nitrosomonas*, que transforma el amoníaco en nitritos y *Nitrobacter*, que posteriormente transforma los nitritos en nitratos, cerrando así el ciclo del nitrógeno.

En contraste con los numerosos estudios que se han realizado tradicionalmente en la superficie terrestre, existe mucha menos información acerca de la existencia de vida en el interior de la corteza terrestre. Pese a que los primeros estudios acerca de la presencia de vida en el subsuelo terrestre se realizaron hace casi 100 años, son escasos

los estudios relacionados con la presencia de vida y la dinámica de las poblaciones microbianas en estos ambientes.

Un ejemplo de estos estudios son los que se vienen realizando desde hace algunos años en el subsuelo profundo continental de la faja pirítica ibérica, que abarca una amplia zona de unos 250 km de longitud desde Portugal hasta la provincia de Sevilla, y que contiene un gran depósito de sulfuros originados como consecuencia de la actividad volcánica hace unos 350 millones de años. En concreto, las perforaciones realizadas en la zona de la Peña de Hierro, en la cuenca minera de Rio Tinto-Nerva (Huelva), hasta una profundidad de 613 metros, han permitido determinar la presencia en dicha matriz rocosa de una comunidad microbiana muy diversa, constituida por especies de microorganismos extremófilos, muchos de ellos desconocidos hasta la actualidad y que actúan como un gran biorreactor, en el cual los minerales sulfurosos constituyen la principal fuente de energía. Dicha microbiota constituye una comunidad muy compleja, que incluye especies muy diferentes, pero que en conjunto crecen y se desarrollan en unas condiciones extremas, independientes de la luz. Estas comunidades microbianas poseen actividades metabólicas complementarias, que incluyen los ciclos biogeoquímicos del carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y hierro. Este y otros estudios semejantes realizados recientemente en otros ambientes terrestres profundos abren una serie de interrogantes y perspectivas acerca de la vida en hábitats con unas condiciones extremas, previamente reconocidos como hábitats inhóspitos, desprovistos de vida o al menos con una biomasa muy limitada. Además, podrían sentar las bases de la posible existencia de vida en otros planetas.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMILS, R., ESCUDERO, C., OGGERIN, M., PUENTE-SÁNCHEZ, F., ARCE-RODRÍGUEZ, A. *et al.* (2023). Coupled C, H, N, S and Fe biogeochemical cycles operating in the continental deep subsurface of the Iberian Pyrite Belt. *Environmental Microbiology* **25**: 428-453.

- ERNST, O.P., LODOWSKI, D.T., ELSTNER, M., HEGEMANN, P., BROWN, L.S. & KANDORI, H. (2014). Microbial and animal rhodopsins: structures, functions, and molecular mechanisms. *Chemical Reviews* **114**: 126-163.
- ESCUADERO, C. & AMILS, R. (2023). Dark biosphere: just at the very tip of the iceberg. *Environmental Microbiology* **25**: 147-149.
- GÓMEZ-CONSARNAU L., RAVEN, J. A., LEVINE, N.M., CUTTER, L.S., WANG D. *et al.* (2019). Microbial rhodopsins are major contributors to the solar energy captured in the sea. *Science Advances* **5(8)**: eaaw8855 (doi: 10.1126/sciadv.aaw8855).
- GONZÁLEZ, J.M., FERNÁNDEZ-GÓMEZ, B., FERNÁNDEZ-GUERRA, A., GÓMEZ-CONSARNAU, L. SÁNCHEZ, O. *et al.* (2008). Genome analysis of the proteorhodopsin-containing marine bacterium *Polaribacter* sp. MED152 (Flavobacteria). *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* **105**: 8724-8729.
- PINHASSI, J., DELONG, E.F., BÉJÀ, O., GONZÁLEZ, J.M. & PEDRÓS-ALIÓ, C. (2016) Marine bacterial and archaeal ion-pumping rhodopsins: genetic diversity, physiology, and ecology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **80**: 929-954.

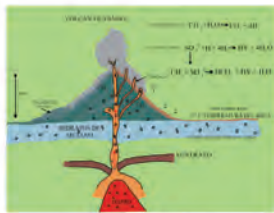


# LA EXPLOSIÓN DE VIDA EN LA DENSA OSCURIDAD DE LOS AMBIENTES HIDROTERMALES OCEÁNICOS

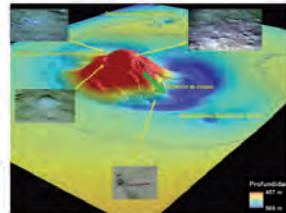
VÍCTOR DÍAZ-DEL-RÍO ESPAÑOL  
*Academia Malagueña de Ciencias*



Una muestra de chimenea carbonatada de las muchas extraídas del fondo marino en el área de los volcanes de fango del Golfo de Cádiz.



Esquema sintético de la formación de los volcanes de fango y las vías que utilizan los flujos hidrotermales. La actividad bacteriana se encarga de disipar la precipitación de carbonatos y la creación de sustratos consolidados.



Los volcanes de fango generan diversos ambientes que son aprovechados por las diferentes especies para para asentar sus comunidades.

Es frecuente observar inestabilidades en los sedimentos que componen la estructura del cono volcánico. Depende, sobre todo, de la inconsistencia de los depósitos y de la saturación de fluidos que posean.



Una muestra de chimenea carbonatada de las muchas extraídas del fondo marino en el área de los volcanes de fango del Golfo de Cádiz.

**Los volcanes de fango se forman tras la eyección de fluidos cargados de gas.**

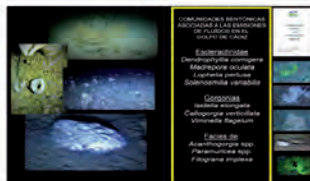
**La actividad bacteriana permite liberar carbonatos que transforman los fondos sedimentarios en sustratos consolidados permitiendo así el asentamiento de comunidades bentónicas**



Los fondos fangosos propios de los focos de emisión de fluidos hidrotermales pueden transformarse en sustratos consolidados bajo la acción de los microorganismos. Así se forman los sustratos donde se asientan las comunidades bentónicas.



Los volcanes de fango se forman a grandes profundidades difíciles de acceder y de observar. Para ello, utilizamos sistemas de observación directa (ROVs) y muestreos directos.



Entre lo más destacable de los procesos que se desencadenan con la expulsión de fluidos es el oportunismo que aprovechan algunas especies que están en riesgo de desaparición, como son algunos corales. Todo se inicia con la actividad bacteriana.



Aquí se muestran cuatro tipos de sustrato carbonatado, de origen autígeno, que son aprovechados por diversas especies bentónicas para establecer sus colonias.



# **LA EXPLOSIÓN DE VIDA EN LA DENSA OSCURIDAD DE LOS AMBIENTES HIDROTERMALES OCEÁNICOS**

VÍCTOR DÍAZ-DEL-RÍO ESPAÑOL  
*Academia Malagueña de Ciencias*

**EL PARADIGMA DEL DESARROLLO DE LA VIDA** en un ambiente dominado por la radiación solar queda relegado, en el medio marino, a la denominada zona fótica, en la que la luz penetra hasta una cierta profundidad que depende de numerosos factores y que genéricamente denominamos transparencia (en términos de turbidez). En función de que la transparencia sea mayor o menor podremos observar como la luz solar penetra en mayor o menor medida. Pero, como criterio general podemos pensar que no alcanza profundidades superiores a los 200 metros, si bien se ha constado, muy excepcionalmente, algún indicio de radiación solar hasta los 700/800 metros.

Del mismo modo que la luz se absorbe rápidamente al penetrar en el océano, así sucede también, y, sobre todo, con la radiación infrarroja que está vinculada al calor provocado por el sol. Los demás colores los va absorbiendo la mar a medida que vamos profundizando en las cuencas marinas. Así, sabemos que la luz roja no es perceptible más allá de los 10 metros de profundidad, la luz amarilla hasta los 30 metros y la luz verde puede ser reconocida hasta los 50 metros. Curiosamente, la luz azul puede alcanzar hasta los 300 metros en buenas condiciones de transparencia. En consecuencia, en las grandes profundidades oceánicas la ausencia de radiación solar es absoluta.

No es menos sorprendente la vistosidad que ofrecen las zonas de fractura y apertura oceánica (bordes de placa) que favorecen la expansión de los océanos. Son muy diversas las formas que adquieren

estas fisuras, siendo las más espectaculares las que predominan en las dorsales oceánicas y sus fosas asociadas. En gran parte de ellas la expulsión de material ígneo incandescente, provoca esa brillante luminosidad que todos hemos apreciado cuando las lavas volcánicas son expulsadas desde el interior de la Tierra y recorren a modo de ríos lávicos la superficie continental. Pero esa ígnea luminosidad no tiene mayor alcance que su propia espectacularidad efímera, si bien, todos los procesos que la extrusión de material cortical y mantélico provoca sí que son trascendentes para el desarrollo de la vida, al igual que para otros procesos geológicos no menos singulares.

Vamos a destacar en este resumen aquellos fenómenos que tienen lugar como consecuencia de la filtración de aguas marinas en el interior de la corteza continental y oceánica y que, tras recorrer variadas distancias por el interior de las rocas y sedimentos marinos (que pueden alcanzar kilómetros), son expulsadas con extrema virulencia generando estructuras geológicas muy diversas, favoreciendo así una exclusiva explosión de vida. En todo ello desempeña un papel crucial el microcosmos bacteriano y la actividad que desencadena provocando frecuentemente bioconstrucciones necesarias para el asentamiento de importantes especies constitutivas de hábitats singulares. Al proceso que generan esos flujos circulatorios de agua marina en el interior de las rocas y su posterior expulsión cargada de sustancias y elementos químicos que se inyectan en el medio marino -y que pueden alcanzar la atmósfera-, lo denominamos hidrotermalismo. En función de los rangos de temperatura que pueden alcanzar dichos flujos podremos diferenciar dos tipos de surgencias: de alta y de baja temperatura.

1. *Hidrotermalismo de alta y baja temperatura.* El descubrimiento de las surgencias termales submarinas cargadas de gases y metales, y la formación de yacimientos minerales generados por la precipitación de los elementos disueltos en los fluidos expulsados del fondo marino, ha permitido conocer mejor los ambientes extremófilos que dominan en dichos yacimientos, así como su biodiversidad.

El sistema geotérmico que gobierna la dinámica terrestre, se hace palpable en los fondos oceánicos profundos, y más particularmente en los bordes de placa activos. Sometida a una inmensa presión

hidrostática, el agua marina se filtra a través de las fracturas de las rocas, desplazándose grandes distancias por el interior de la corteza oceánica. Este fenómeno de migración horizontal o vertical del agua a través de las discontinuidades de las rocas (fracturas, porosidad, planos de contacto, etc.) se ve muy favorecido por el cuadro tectónico que afecta a las unidades geológicas receptoras del fluido áqueo. El flujo incrementa su temperatura y se carga de elementos químicos y gas que son violentamente expulsados al exterior de la roca en el momento que encuentran una vía de escape. Este flujo hidrotermal, que podría haber alcanzado unos 450° C, en su rápido ascenso hacia la superficie, penetra bruscamente en el agua marina, que se encuentra a unos 2° o 3° C, experimentando un enfriamiento súbito que fuerza la precipitación de una gran parte de los elementos disueltos que transporta.

Lo más frecuente es que se produzcan estructuras de geometría cilíndrica o troncoconica, con un conducto central por el que escapa el fluido hidrotermal. Se disponen casi verticalmente sobre el fondo, de manera agrupada o individualizada, y se denominan chimeneas o fumarolas. Están constituidas, principalmente, por sulfuros (calcopirita, blenda, pirita, galena y otros), lo cual les confiere un inmenso valor como yacimiento mineral estratégico. Existen otras formas de depósito que se generan a partir del material suspendido que se desplaza con las masas de agua expulsadas por las chimeneas. De esta manera pueden formarse costras o enriquecer los sedimentos preexistentes con los metales que se van precipitando -sedimentos metalíferos- y que circundan las áreas de expulsión de los fluidos.

Partiendo de este modelo de expulsión de fluidos termales, podemos reconocer toda una gama de estructuras que responden a emisiones con temperaturas progresivamente más frías, enmarcadas en contextos geológicos (bordes de colisión, prisma de acreción, etc.) y fisiográficos (litoral y margen continental, cuenca profunda) diferentes. Dentro de los propios ambientes de dorsal podremos encontrar chimeneas negras (producidas por los flujos caloríficos magmáticos de ascenso rápido cargados de metales, con rangos de temperatura de unos 350° C a 450° C) y chimeneas blancas (flujos caloríficos magmáticos de ascenso lento, sin elementos metálicos, con rangos de temperatura inferiores a 300°

C y crecimiento más lento que las anteriores), caracterizados por ser fluidos generados en ambientes basálticos.

En contextos ajenos a las dorsales, dominados por rocas peridotíticas, existen escapes de fluidos fuertemente alcalinos, de baja temperatura (75° C en la boca de las chimeneas), cargados de iones carbonáticos que, al reaccionar con el calcio disuelto en el agua del mar, favorece la edificación de las chimeneas carbonatadas y otras estructuras menores similares a los travertinos. El fluido es expulsado hacia la superficie del fondo, por efecto de la reacción fuertemente exotérmica (puede alcanzar los 250° C) que se produce en la transformación del olivino en serpentina y magnetita. Suelen estar cargados de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{S}_2$  y  $\text{SH}_2$ ) que ocasionalmente pueden ir acompañados de metano, nitrógeno y algunos otros. Estos fluidos habitualmente escapan con extrema violencia y generan chimeneas perforantes en la roca volcánica suprayacente, pero en ningún caso son consecuencia de la precipitación de los elementos que transporta. Las surgencias submarinas de agua subterránea (meteórica, fósil e hidrotermal) poseen unas intensidades de flujo muy variadas, y podrían modificar las condiciones ambientales (salinidad, temperatura, pH, nutrientes, gases, etc.) locales alrededor de los puntos de expulsión, con la consiguiente modificación de sus hábitats. Este es un fenómeno más común en plataforma continental.

De gran importancia ambiental es el proceso de soterramiento de los restos de organismos vivos y su contribución al medio marino. Su diagénesis genera productos como el petróleo o el gas, cuya existencia determina la formación de hidratos de gas y la expulsión de fluidos hidrocarburos. Este mecanismo está gobernado por la actividad bacteriana y las condiciones de presión y temperatura en el lugar del enterramiento. La disociación de los hidratos y la liberación de metano a baja temperatura, permiten que las bacterias se concentren en los lugares de expulsión y realicen la oxidación anaeróbica del metano, favoreciendo la precipitación de carbonatos. Son las llamadas surgencias frías. De esta forma se han construido los complejos entramados de canalizaciones existentes en distintos lugares del fondo marino por donde escapa el gas metano libre, que están constituidas por carbonatos autigénicos. La actividad de las bacterias quimiotrofas, archeobacterias

y bacterias sulfato-reductoras, son las responsables del sostenimiento de los singulares ecosistemas de la superficie del fondo. Concentran su actividad en los intersticios de los sedimentos disgregados facilitando la precipitación del carbonato, y más particularmente en las paredes de los nichos excavados por los crustáceos decápodos y otras especies excavadoras, por donde fluye el gas hacia la superficie del fondo marino con mayor facilidad. La comunidad asociada se caracteriza por la presencia de tapetes de sulfobacterias filamentosas quimiótrofas como *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiothrix*, que utilizan los procesos de oxidación del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) como fuente de energía. La posterior erosión de los depósitos sedimentarios determina la exhumación de las galerías y de esa misma manera también afloran las conocidas chimeneas carbonatadas autigénicas. La eyección de fluidos sobrepresionados cargados en gas arrastrando gran cantidad de fango depositado en el fondo marino, forma unos relieves de geometría cónica denominados volcanes de fango, donde se concentra una gran actividad bacteriana.

Existen otras morfologías singulares como son los “pock marks” que se forman con relativa frecuencia sobre los planos de fractura que tienen expresión en la superficie del fondo marino. Es muy habitual encontrarlos alineados con tamaños similares siguiendo una dirección estructural. Su nivel de desarrollo es muy variado al igual que su evolución morfológica. Se trata de auténticos orificios de geometría cónica invertida, de tamaño por lo general métrico con diversas honduras que se han producido por la expulsión rápida y violenta de fluidos fríos. El aspecto del fondo marino se asemeja al de una superficie repleta de cráteres, ocupando inmensos campos dominados por estos orificios horadados de abajo a arriba.

2. *Hábitats generados al amparo de las expulsiones de fluidos hidrotermales de baja temperatura.* Desde luego, no son menores en importancia los hábitats (algunos de ellos están incluidos en el Anexo I de la Directiva de Hábitats de la Unión Europea -Directiva 1992/43/EEC: “Estructuras submarinas producidas por el escape de fluidos, 1180”; “Arrecifes, 1170”-) que se generan al amparo de las surgencias hidrotermales. Entre otras, se pueden citar: (1) agregación de esponjas; (2) corales de aguas frías; (3) agregaciones de pennatuláceos; (4) gorgonias y otros antozoos;

(5) elasmobránquios (tiburones y rayas); (6) peces y decápodos de interés comercial.

Los hábitats generados al amparo de las expulsiones de fluidos fríos (surgencias), son consecuencia de la relación existente entre los procesos inorgánicos en las capas subsuperficiales y la actividad biológica existente en las zonas de escape. De ahí la importancia que tiene la actividad bacteriana en el sostenimiento de los ecosistemas que se generan en superficie, ya que estas bacterias quimiótrofas están en la base de las cadenas tróficas de esas comunidades. En estos ambientes, se produce una simbiosis entre las bacterias anaeróbicas que consumen  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  o  $\text{SH}_2$ , y las especies bentónicas y nectobentónicas, como son los gusanos tubícolas, bivalvos o decápodos, que se concentran abigarradamente junto a los escapes. Sabemos que la biodiversidad en las zonas de expulsión es bastante limitada, pero abundante en número de individuos y colonias. Son ecosistemas de gran fragilidad y de difícil recuperación, sensibles a los cambios ambientales (modificaciones termohalinas de las corrientes de fondo) y, sobre todo, a las intervenciones humanas directas. El aspecto más relevante de los ecosistemas extremófilos que se generan en torno a las surgencias termales o frías, es que, por lo general, están asociados a importantes yacimientos minerales o de hidrocarburos. El conocimiento que tenemos de su dinámica y su equilibrio ecológico es muy limitado, lo cual parece recomendar que se imponga el principio de precaución, antes de iniciar su explotación, en espera de incrementar el conocimiento científico y prever así los impactos ambientales de tal actividad. El riesgo ambiental de una posible explotación de los hidratos de gas, pone en cuestión la conveniencia de considerar explotables estos recursos energéticos, puesto que se podría liberar a la atmósfera una cantidad ingente de metano, como consecuencia de los megadeslizamientos que generaría su extracción.

## REFERENCIA

DÍAZ-DEL-RÍO, V. *et al.*, 2014. Caracterización física y ecológica del área marina de “Los volcanes de fango del golfo de Cádiz”. *Informe Final LIFE+ INDEMARES (LIFE07/NAT/E/000732)*. IEO y Fundación Biodiversidad, Madrid: 197pp.



# ¿VIDA LEJOS DE LA TIERRA?

ALBERTO J. CASTRO-TIRADO  
*Academia Malagueña de Ciencias*

### Exoplanetas potencialmente habitables

Ordenados en función de su distancia a la Tierra

Nombre	Distancia (años luz)
Proxima Centauri b	4.2
Ross 128 b	111
Gliese 163 c	132
Gliese 581 e	124
Gliese 667 c	124
Kepler 90 c	127
Kepler 90 f	127
Kepler 90 g	127
Kepler 90 d	127
Kepler 90 e	127
Kepler 90 b	127
Kepler 90 h	127
Kepler 90 i	127
Kepler 90 j	127
Kepler 90 k	127
Kepler 90 l	127
Kepler 90 m	127
Kepler 90 n	127
Kepler 90 o	127
Kepler 90 p	127
Kepler 90 q	127
Kepler 90 r	127
Kepler 90 s	127
Kepler 90 t	127
Kepler 90 u	127
Kepler 90 v	127
Kepler 90 w	127
Kepler 90 x	127
Kepler 90 y	127
Kepler 90 z	127

Representación artística. La Tierra, Marte, Júpiter y Neptuno a escala. Distancia a la Tierra en años luz (ly) entre corchetes. CREDIT: PHL @ UPR Avenida Iglesias #162 Jan 5, 2022

Concepción artística de la Vía Láctea, una galaxia espiral barrada, con esta forma inferida de multitud de observaciones multitrango (Nick Risinger, Wikipedia.org). El Sol está ubicado a 24.000 años-luz del centro galáctico.

Ilustración, a escala logarítmica, del Universo observable con el Sistema Solar en el centro. Desde el centro y hacia afuera: los planetas interiores, el cinturón de asteroides, los planetas exteriores, el cinturón de Kuiper, la nube de Oort, Alfa Centauri (la estrella más próxima al Sol), el brazo espiral de Perseus, la Vía Láctea, la de Andrómeda y otras galaxias cercanas, la telaraña cósmica de cúmulos de galaxias, la radiación de fondo de microondas y el plasma invisible de la "Gran Explosión" (que dio origen al Universo hace 13.700 millones de años), ya en el borde (Pablo Carlos Budassi, Wikipedia.org).

### EL GRAN FILTRO

Salto evolutivo comúnmente alcanzados

Una especie que, por acontecimientos anómalos, consigue pasar el Gran Filtro

Avance de la especie

Origen de la vida

Salto evolutivo que casi ninguna especie consigue dar (es decir: EL GRAN FILTRO)

Civilización Tipo III (Kardashev 1964)

waitbutwhy.com

Representación esquemática del Gran Filtro (waitbutwhy.com) (Ibda.) y de una nave interestelar no tripulada (dicha.) proveniente de una civilización que ya hubiera pasado dicho filtro.



# ¿VIDA LEJOS DE LA TIERRA?

ALBERTO J. CASTRO-TIRADO  
*Academia Malagueña de Ciencias*

## INTRODUCCIÓN

**SERÍA PRETENCIOSO DECIR, A ESTAS ALTURAS** del s. XXI, que la Tierra es el único mundo habitado en el Cosmos. Sería como retrotraernos a la época de Platón y Aristóteles en el que la Tierra se situaba en el centro del Universo, teoría geocéntrica que luego fue apuntalada por Ptolomeo en el s. II. Tendríamos que esperar a la implantación del modelo heliocéntrico en el s. XVI por parte de Copérnico, reforzada por las leyes de Kepler un siglo después, para situar a la Tierra orbitando alrededor del Sol.

Entonces, ¿qué probabilidad hay de que haya alguna otra civilización distinta de la nuestra en la Vía Láctea? La ecuación de Drake nos da la respuesta, según los factores que consideremos en la misma. Y la cuestión de fondo es si, en el caso de haber más de una civilización, cuántas de ellas habrán pasado el “Gran Filtro”. ¿La nuestra?

## PLANETAS EXTRASOLARES

Desde el primer planeta extrasolar (llamado Dimidio) orbitando la estrella 51 Pegasi (rebautizada como Helvetios) y descubierto en 1995 (Mayor & Queloz 1995), más de 5.000 planetas extrasolares han sido detectados hasta la fecha y algunos de ellos, incluso estarían ubicados en la llamada “zona de habitabilidad”, por lo que, en teoría, serían susceptibles de poder acoger vida (Seager, 2013). Esta cifra de más de 5.000 planetas extrasolares han sido encontrados en un radio de sólo 300 años-luz del Sol.

La búsqueda de exoplanetas incluye la posibilidad de encontrar mundos habitables. Los miles de exoplanetas conocidos y candidatos a planetas son extremadamente diversos en términos de sus masas, tamaños, órbitas y tipo de estrella anfitriona alrededor de la cual orbitan. La diversidad se extiende a nuevos tipos de planetas, que son muy comunes pero que no tienen equivalentes en el Sistema Solar (Marcy & Butler 1998). Incluso con el requisito de que la temperatura de la superficie de un planeta debe ser compatible con el agua líquida (porque toda la vida en la Tierra requiere agua líquida), pudiera ser que planetas muy diferentes de la Tierra tuvieran otras condiciones también adecuadas para la vida. Esto allanaría el camino para aumentar en un futuro la posibilidad de descubrir otros mundos habitados (o habitables).



**Concepción artística de los planetas potencialmente habitables descubiertos hasta 2023, y su comparación con algunos del Sistema Solar (PHL @ UPR-Arecibo).**

## EL JARDÍN DE LAS GALAXIAS

Se estiman en más de 200.000 millones el número de estrellas que pueblan nuestra galaxia, la Vía Láctea, la cual que tiene un radio de 53.000 años luz.

La Vía Láctea forma parte del llamado Grupo Local, el cual está dominado por otras dos galaxias espirales gigantes (aparte de la

nuestra): la de Andrómeda y la del Triángulo. El resto de galaxias, unas 40, son más pequeñas; muchas de ellas son galaxias satélite de alguna de las mayores. A su vez, nuestro Grupo Local está contenido dentro del Cúmulo de Virgo que pertenece al Supercúmulo Local (o de Laniakea), cuyo centro gravitatorio es el denominado Gran Atractor, hacia el cual se dirige el Grupo Local.



**Concepción artística de la Vía Láctea, una galaxia espiral barrada, con esta forma inferida de multitud de observaciones multirrangos (Nick Risinger, Wikipedia.org). El Sol está ubicado a 24.000 años-luz del centro galáctico.**



**Ilustración, a escala logarítmica, del Universo observable con el Sistema Solar en el centro. Desde el centro y hacia afuera: los planetas interiores, el cinturón de asteroides, los planetas exteriores, el cinturón de Kuiper, la nube de Oort, Alfa Centauri (la estrella más próxima al Sol), el brazo espiral de Perseus, la Vía Láctea, la de Andrómeda y otras galaxias cercanas, la telaraña cósmica de cúmulos de galaxias, la radiación de fondo de microondas y el plasma invisible de la "Gran Explosión" (que dio origen al Universo hace 13.700 millones de años), ya en el borde (Pablo Carlos Budassi, Wikipedia.org).**

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una de las más de 2 billones que pueblan los cúmulos de galaxias, distribuidos en los filamentos de materia y gas que se entrecruzan en el Universo observable, el cual tiene un radio actual de 46.500 millones de años luz.

## LA ECUACIÓN DE DRAKE

La famosa ecuación fue presentada por el astrónomo Frank Drake en 1961 durante la primera conferencia sobre el proyecto SETI de búsqueda de inteligencia extraterrestre. Su objetivo era determinar el número de civilizaciones que podrían comunicarse en nuestra Galaxia. Se representa así:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

donde  $N$  denota el número de civilizaciones que podrían comunicarse en nuestra galaxia, la Vía Láctea, siendo los 7 factores de la ecuación los siguientes: i)  $R^*$  es el ritmo anual de formación de estrellas “adecuadas” en la galaxia; ii)  $f_p$  es la fracción de estrellas, que tienen planetas en su órbita; iii)  $n_e$  es el número de esos planetas orbitando dentro de la zona de habitabilidad de la estrella; iv)  $f_l$  es la fracción de esos planetas dentro de la zona de habitabilidad en los que la vida se ha desarrollado; v)  $f_i$  es la fracción de esos planetas en los que la vida *inteligente* se ha desarrollado; vi)  $f_c$  es la es la fracción de esos planetas donde la vida inteligente ha desarrollado una tecnología e intenta comunicarse; y vii)  $L$  es el lapso medido en años durante el que una civilización inteligente y comunicativa puede existir.

Según el valor que se dé a cada uno de los factores, los resultados obtenidos serán muy dispares, oscilando entre 1, es decir, una única civilización (¡la nuestra!), 10.000 (el valor que defendía Drake) y ... ¡decenas de millones!

Sabiendo que la vida útil máxima de las civilizaciones comunicativas depende del tipo espectral de la estrella anfitriona, ello implica que las estrellas de tipo espectral F y G (el sol es G2V) son los mejores lugares

para buscar signos de inteligencia tecnológica en la actualidad (Haqq-Misra & Kumar Koppurapu, 2017) sin descartar las estrellas enanas de tipo M (Guillon et al. 2017). Otras variantes de la ecuación de Drake pueden consultarse en Devora (2017) y Molina Molina (2019).

## LA PARADOJA DE FERMI (1950) Y EL GRAN FILTRO (1996)

La paradoja de Fermi, surgida en 1950 durante una conversación informal entre el físico Enrico Fermi y otros 3 colegas, surgió a raíz de la aparente contradicción que hay entre las referidas estimaciones que afirman con una alta probabilidad de que existan otras civilizaciones inteligentes en el universo observable y la ausencia de evidencia de dichas civilizaciones hasta ahora. Si existen millones de posibilidades de que haya civilizaciones inteligentes, ¿por qué ninguna ha contactado aún con nosotros?

Una explicación sería la existencia de un “Gran Filtro”, término acuñado por el economista Robin Hanson en 1996 y que reduciría drásticamente la enorme cantidad de lugares en el Universo en que especies inteligentes pudieran prosperar en civilizaciones observables por nuestros medios y mucho menos, evolucionar a una civilización de nivel superior en la escala de Kardashev (1964).



**Representación esquemática del Gran Filtro (waitbutwhy.com) (izda.) y de una nave inter-estelar no tripulada (dcha.) proveniente de una civilización que ya hubiera pasado dicho filtro.**

Así pues, la existencia de vida lejos de nuestro planeta, en otros puntos del Universo, no es nada desdeñable. Sea como fuere, no hay evidencia alguna de haber sido visitados por alienígenas. O al menos, constancia alguna de que naves interestelares no tripuladas hayan escudriñado la Tierra y pasado luego de largo explorando otros mundos. ¿O tal vez sí?

## BIBLIOGRAFÍA

- DEVORA, L. (2017). *Modificación de la ecuación de Drake, Universo Oculto*. <http://luisdevora.com/?p=517>
- DRAKE, F. (1961). Presentation at a conference at Green Bank, West Virginia.
- GUILLON, M. *et al.* (2017). Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, **542 (7642)**: 456-460.
- HAQQ-MISRA, J. & KUMAR KOPPARAPU, R. (2017). The Drake Equation as a Function of Spectral Type and Time. In R. GORDON & A. SHAROV (eds.), *Habitability of the Universe Before Earth*, Elsevier.
- KARDASHEV, N. (1964). Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy*, **8(2)**: 217-221.
- MARCY, R.P. & BUTLER, G.W. (1998). Detection of extrasolar giant planets. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **36**: 57-98.
- MAYOR, M. & QUELOZ, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, **378**: 355-359.
- MOLINA MOLINA, J.A. (2019). Searching for a standard Drake equation. *Journal of the British Interplanetary Society*, **72(8)**: 259-265.
- SEAGER, S. (2013). Exoplanet habitability. *Science*, 340: 577-581.



# **EPÍLOGO**

BENITO VALDÉS Y ENRIQUE F. HITA  
*Instituto de Academias de Andalucía*



## EPÍLOGO

**ESTA EXPOSICIÓN, INICIATIVA DEL INSTITUTO** de Academias de Andalucía en conexión con el Comité Español del Día Internacional de la Luz, es el resultado del trabajo de un grupo de investigadores que, desinteresadamente, han querido colaborar así con la conmemoración de esta efemérides, ocupándose de una serie de temas que dan a conocer la importancia que la luz tiene en algunos aspectos de la Ciencia y la Técnica en general y, como consecuencia, de la vida y del bienestar de la humanidad.

La conforman cuatro bloques temáticos íntimamente relacionados entre sí. El primero cubre diversos aspectos de la naturaleza de la luz, su producción y sus aplicaciones. El segundo se ocupa del fenómeno de la visión por la especie humana. El tercero trata de los pigmentos naturales, su importancia biológica y la visión del color en los animales. El cuarto, del papel de la luz en el origen de la vida, y de si es posible ésta sin intervención de la luz y fuera de nuestro planeta.

Se inaugura primero en Sevilla, en el Patio de la Fuente del edificio central de su Universidad, antigua Fábrica de Tabacos, construida en el siglo XVIII por el arquitecto flamenco Sebastián van der Borch, cuando España ostentaba el monopolio del comercio del tabaco. Se expondrá a continuación en Granada, en el Atrio de la Facultad de Ciencias de su Universidad, y posteriormente en Málaga, en la sede de la Sociedad Económica de Amigos del País, por lo que podrán beneficiarse de su contenido, no sólo especialistas en los temas tratados, sino la sociedad en general, materializándose así la vocación y la obligación de que el Instituto de Academias de Andalucía y las academias e instituciones implicadas cumplan uno de sus cometidos, que es la divulgación del conocimiento. Con esta premisa y con la idea de que la exposición pueda llegar al mayor número posible de personas,

la Fundación Descubre se ocupará con posterioridad de que pueda exponerse en los centros docentes y culturales que lo soliciten.

Sevilla-Granada  
16 de mayo de 2023  
Benito Valdés y Enrique F. Hita  
Instituto de Academias de Andalucía



