

# AREA

**AGENDA DE REFLEXIÓN EN ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO**  
*agenda of reflection in architecture, design and urban-planning*

número 4  
Agosto 1996



## CONTENIDOS/CONTENTS

7. **Editorial**
9. *María L. F. de Mattiello*  
**Una breve historia del lux y el lumen**
23. *Verónica Paiva*  
**Entre miasmas y microbios: La ciudad bajo la lente del higienismo. Buenos Aires 1850-1890**
33. *David Kullock*  
**Sistemas de ciudades y desarrollo regional: Reflexiones sobre su interrelación**
41. *Horacio Berretta*  
**Tecnología apropiada y vivienda para las mayorías**
51. *Renée Dunowicz, A. Gerscovich, T. Boselli, R. Perazzo y R. Topolevsky*  
**La calidad: Un nuevo enfoque hacia el mejoramiento en la producción del hábitat**
63. *Claudia Gastrón, Susana Casas y Cecilia Amstutz*  
**Auditoría tecnológica en paneles de base cerámica**
75. **Nota**  
Algo más de matemática  
*por Vera W. de Spinadel*
77. **Reseñas de libros**  
Mathematical impressions  
Symmetry. A unifying concept  
*por Vera W. de Spinadel*
79. **Information for authors and contributors**

Los contenidos de AREA aparecen en:  
The contents of AREA are covered in:  
*Architectural Publications Index*

## AREA

AGENDA DE REFLEXIÓN EN ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO  
*agenda of reflection in architecture, design and urban-planning*

número 4, agosto 1996

# UNA BREVE HISTORIA DEL LUX Y EL LUMEN

María L. F. de Mattiello

visión  
vision

óptica  
optics

luz  
light

fotometría  
photometry

radiaciones  
radiations

Laboratorio de Investigaciones Visuales,  
Consejo Nacional de Investigaciones  
Científicas y Técnicas  
Instituto de la Visión

Dirección: Marcelo T. de Alvear 2261, piso 5,  
1122 - Buenos Aires, Argentina.  
Tel/fax: (54-1) 825-3838.  
E-mail: pravis@ubafm.edu.ar

*El presente trabajo se ocupa de la historia de la luz, el color y la formación de las imágenes. Analiza las creencias que retrasaron los estudios y confundieron la naturaleza de los fenómenos relacionados. Hace hincapié en la importancia de la historia y significado de las palabras "lux" y "lumen" para comprender una realidad que fluye entre lo físico y lo psíquico y que es responsable de nuestra capacidad de "ver".*

## Introducción

Las investigaciones visuales se caracterizaron desde un comienzo por su dualidad físico-fisiológica, y una prueba de ello es la etimología de las palabras *lux* y *lumen*, de empleo en la antigüedad. El diccionario latino-español de Raimundo de Miguel (1908) dice del *lux*: luz, resplandor, claridad del alba; dejando en claro el carácter físico del término. Sobre el *lumen* anota: claridad, humor cristalino del ojo, y citando como ejemplo una frase de Cicerón agrega, "lumbreras de la República", refiriéndose a los hombres preclaros que para ese entonces gobernaban Grecia. En estas definiciones queda explícito que el *lumen* refería a "algo" que pertenecía al hombre.<sup>1</sup> Po-

### **A brief history of lux and lumen**

*The present work deals with the history of light, color and image construction. It analyzes the beliefs which delayed studies and led to misunderstandings on the nature of the phenomena related to them. It insists on the importance of the history and the meaning of the words "lux" and "lumen" to understand the reality that goes from physical to psychical facts and that conditions our capacity to "see".*

1. Actualmente, *lumen* es la unidad de flujo luminoso: la cantidad total de luz (medida en watt) que radia por segundo una fuente de luz cuya

siblemente, y por extensión, los antiguos llamaron lumen al “agente interno” reservando el término lux para el “agente externo”.

Cuando el latín fue desplazado por las lenguas vulgares, estos dos términos se confundieron en uno solo: luz. Esta confusión no se dio para otros continuos sensoriales, como por ejemplo la temperatura, donde se deslindó la medición física de la medición psicofísica de caliente y frío.

Esta historia constituye la esencia del libro de Vasco Ronchi (1897-1988) *Storia de la luce* (1983), de ineludible referencia en toda historia de la ciencia. Este destacado investigador, que nos visitara en la Argentina en la década del setenta, lideró gran parte de la óptica de este siglo; y de su obra nos interesa rescatar parte de sus pensamientos por creerlos importantes para esclarecer la aventura que fue entender: qué era la luz y la visión, el presente y futuro de las investigaciones visuales, y al decir de Ortega y Gasset (1947) “cómo resolver nuestra desesperación” por comprender un tema que aún hoy discutimos porque, por sobre todas las cosas, la visión es el órgano sensorial más potente que tenemos y el que más nos intriga.

Ronchi dice en una de sus obras:

Muchos no se interesan por el significado de las palabras porque piensan que es una inútil cuestión de términos; pero el hecho es que las palabras representan las ideas y si estas son confusas también lo son ellas. (Ronchi 1968: xl)

Justamente por ello, tratamos de analizar la historia del lux y del lumen a fin de aclarar aspectos de la física y la fisiología de la visión que, por repetidos, se aceptan sin saber su origen.

---

*longitud de onda es 555 nm; mientras que lux es la unidad de la intensidad de iluminación: el flujo luminoso incidente por unidad de superficie. Ambas medidas se consideran fotométricas ya que ambas en su formulación tienen en cuenta la sensibilidad visual del observador patrón (ver Figura 6). La diferenciación establecida por el latín no se mantiene.*

## Desarrollo

Un punto de partida razonable para esta historia podría ser el siglo IV antes de Cristo. Para ese entonces, Aristóteles había dividido los sentidos en internos y externos. Los primeros correspondían al sentido común, imaginación, valoración y memoria, los externos a la visión, oído, gusto, tacto y olfato. Sobre estos últimos, Aristóteles afirmaba que necesitaban “la presencia de objetos sin los cuales no podían conocer”. Así, todo sentido externo debía funcionar bajo la acción de un factor externo y por “contacto” físico. En consecuencia, las acciones a distancia no eran consideradas.

Bajo esta aseveración, la investigación visual encontró dificultades que retrasaron su desarrollo por dos milenios, ya que era muy difícil saber qué “contactaba” con los ojos para que éstos pudieran ver una representación del mundo aparente, con colores, movimientos, formas, contrastes, etc. Hasta finalizar la antigüedad grecorromana, este problema generó numerosas teorías. Entre ellas se destacaron dos: la del rayo visual y la de la emisión.

El rayo visual fue concebido como bastones rectilíneos saliendo del ojo. Ellos eran capaces de explorar el mundo externo reportando al ojo la información que necesitaba para “ver”. La singularidad de la idea fue extraída de los ciegos que para conocer una forma la tocaban con sus manos o con un bastón. Esta concepción encontró un terreno muy favorable en los matemáticos, que la aplicaron con éxito al estudio de la perspectiva y más tarde al trazado de las sombras, dos disciplinas que se enseñan del mismo modo hasta el presente.

La teoría de la emisión, por el contrario, era difícil de comprender y sólo era sostenida por las escuelas epicúreas. Ella afirmaba que la visión sería provocada por “algo” que emitían los cuerpos. Este algo o flujo penetraría por la pupila excitando al ojo.

La teoría de los rayos visuales sirvió a Euclides (III a.C.) para escribir sus dos libros sobre óptica y catóptrica, y a Tolomeo (127-151 d.C.) para sus estudios astronómicos y en particular para su *Óptica*, en la cual desarrolló un estudio cuidadoso de los espejos esféricos.

Las dos teorías fueron compatibilizadas más tarde por Platón (427-347 a.C.). Él insistió, y fue aceptado por todos, en que los sentidos no eran mecanismos informativos perfectos y en consecuencia podían fallar. Así se sostuvo que el mundo aparente construido por la psiquis en base a la información que le llegaba de los sentidos no daba garantías sobre lo que realmente se veía. Platón trató de establecer una cierta jerarquía entre los sentidos más confiables y los menos confiables, colocando en último término a la visión. La falta de fe en lo que se veía constituyó un canon de la filosofía antigua y se hizo oficial una drástica sentencia: “no se puede hacer ciencia por medio de la vista. La visión debe ser controlada por el tacto”.

Esta fue una conclusión grave para la ciencia experimental y la principal causa de que las investigaciones visuales se detuvieran. (Ronchi 1968: xiii)

Pero como el hombre necesitaba seguir conociendo y resolviendo los problemas cotidianos, apareció un nuevo grupo de personas que, no haciendo caso de los principios establecidos, se dedicaron a resolver problemas de índole práctica. El ambiente de los sabios y cultos de la academia miró a estos hombres como seres inferiores y los llamó técnicos o artesanos. Así, el siglo I antes y después de Cristo fue una época desdoblada en sus objetivos.

En el siglo II aparece Galeno (129-200). Su interés concreto fue la anatomía del ojo. Él puso en evidencia la estructura sumamente compleja del mismo y su unión con el nervio óptico. También vislumbró que el ojo era sólo una estación de relevo en el proceso visual.

Las vicisitudes del período histórico que siguió a la época de Galeno determinaron que este tipo de estudios se refugiaron en Medio Oriente, y mientras que la filosofía y la ciencia occidental atravesaban una crisis profunda floreció la actividad en el mundo islámico. Dos son las personas importantes de este período, Alkindi (813-873) y Alhazen (965-1039) ambos, pertenecientes a la Escuela de Bagdad.

Alkindi trató especialmente el mecanismo de la visión y afirmó que el ojo era estimulado por rayos ex-

ternos que provenían del medio externo. Alhazen revalorizó la teoría de la emisión y logró conciliarla con la de los rayos rectilíneos que postulaba Alkindi. También enunció dos reglas: “cada elemento de la superficie de un cuerpo luminoso o iluminado, emite imágenes elementales en todas direcciones” y “las imágenes elementales que emite un cuerpo grande, penetran en el ojo estimulando lo sensorio y siguiendo un orden idéntico al de emisión”. Había nacido el concepto de imagen retiniana y estaba en embrión el concepto de fase. El agente externo, fue denominado lumen y lo que la psiquis recibía o agente interno, lux.

La escuela árabe se conoció en occidente por un monje polaco del siglo XIII de nombre Witelo o Vitellione. Su texto, que era una copia de los trabajos de Alhazen, fue impreso en 1533. En 1572, por interés de Pietro Ramus y por obra de Federico Risner, el manuscrito de Alhazen fue traducido y adjuntado al texto de Vitellione.

Sin embargo, en el ámbito de la cultura occidental, estos libros fueron tomados con cierta frialdad. Los matemáticos, que naturalmente se nutrían de Euclides, continuaron sirviéndose de la teoría de los rayos visuales, y si bien ellos debían aceptar que no se correspondían con la totalidad de los fenómenos, sostenían correctamente que constituía un óptimo instrumento para el estudio de la perspectiva y el trazado de las sombras. Lo cierto es que al finalizar este período histórico ya no se dudaba de que la visión tenía lugar por la acción del lumen sobre el ojo.

El problema central era el lux, que algunos todavía consideraban de naturaleza divina. El lux fue objeto de discusión sobre todo para establecer si se trataba de una “sustancia” o “accidente”, o simplemente de una “cualidad”.

Para esta época, los interesados en el tema se agruparon en tres líneas definidas, sentando el carácter eminentemente interdisciplinario que caracterizaría de aquí en más las investigaciones visuales. Estas líneas fueron: la propia de los matemáticos, que sostenían la teoría de los rayos visuales, la de la escuela árabe, de carácter físico-fisiológico, y la netamente metafísica de la filosofía occidental del siglo XIII.

A esta altura de la historia, los físicos llegaron a la siguiente conclusión: los rayos solares iluminan los

cuerpos (idea del lumen); con esto provocan la emisión de una “especie” de partículas que —según lo sostenido por Alhazen— penetran en el ojo permitiendo ver el mundo aparente (idea del lux).

Si bien para la visión directa de un objeto pequeño sin campo circundante estas conclusiones podían satisfacer a los filósofos, las ideas se volvían confusas cuando los rayos eran interceptados por elementos ópticos. Los espejos, en particular, constituían un misterio insoluble. Recordemos que para esa época los había planos, esféricos, cónicos, cilíndricos o de cualquier otra curvatura, y en ellos el mundo aparente se hacía mucho menos comprensible. Así, para muchos, las imágenes continuaban siendo un engaño.

Un nuevo hecho, destinado a tener consecuencias imprevisibles, apareció entre 1280 y 1285. Algunos artesanos, poniendo delante de los ojos de personas ancianas discos de vidrio mejoraban su visión. Como estos vidrios se parecían a lentejas, se los denominó lentes de vidrio. La aplicación de las lentes a los presbíteros fue una casualidad, pues nadie sabía todavía qué era la presbicia.

El nombre vulgar asignado al descubrimiento revela su origen artesanal no científico. *Un catedrático nunca hubiera dado este nombre a uno de sus descubrimientos*, y como los catedráticos no creían en los artesanos volvieron a decir: “las lentes de vidrios son engañosas; no miren a través de las lentes si no quieren ser engañados”. Sin embargo, los artesanos que sabían graduarlas modificando el radio de curvatura, siguieron prestando un gran servicio a la comunidad y sólo por ello no desaparecieron.

El ostracismo de la ciencia respecto a las lentes duró tres siglos y finalmente su aceptación se debió a la intervención de Battista Della Porta (1535-1615), J. Kepler (1571-1630) y Galileo Galilei (1564-1642). (Ronchi 1968: xxi)

Della Porta dedica un capítulo entero de su *Magia naturalis* a lentes y dispositivos ópticos. Al año siguiente se construye el primer catalejo de que se tenga noticia. Según un documento del holandés De Waard, el catalejo fue construido en Italia y llevado a Holanda en 1604, siendo reproducido por artesanos holandeses. En el mismo año Kepler publica el

*Paralipomena ad Vitellionem*, que se convierte en la verdadera piedra fundamental para la historia de la óptica. En esta obra se encuentra la clave del mecanismo de la visión y de la óptica casi como se enseña actualmente.

Kepler retoma la hipótesis de la óptica árabe según la cual de cada punto de un cuerpo luminoso o iluminado y en toda dirección llegan imágenes al ojo. En sus trabajos él sólo consideró trayectorias rectilíneas que denominó “rayos”, pero estos nuevos rayos nada tenían que ver con los rayos visuales considerados en la óptica medieval.

Kepler tampoco pensaba que la retina fuera el final del proceso visual. La consideró sólo un punto intermedio del largo recorrido que la información cumple hasta llegar a la corteza visual, y señaló que para tener la clave del mecanismo visual era necesario definir el proceso por el cual la psiquis toma del estímulo, o imagen retiniana, los elementos necesarios para representar el mundo aparente. Kepler no habló mucho de la luz y del color, y concentró su atención en la forma y su posición, problema que para ese entonces era de gran complejidad.

Se dio cuenta que el problema más arduo para la psiquis no era sólo localizar la forma sino calcular su distancia, ya que este dato era necesario para poder definir el tamaño. Como él trataba de resolver distancias, y en topografía las distancias se determinaban mediante triangulaciones, fue al encuentro del triángulo, y lo encontró en el que tiene por vértice la fuente lumínica y por base el diámetro pupilar.

Kepler no se contentó con explicar la imagen real de los objetos, también explicó la imagen virtual a través de espejos planos. Se dio cuenta que el cono de rayos que entra en el ojo debía tener a partir de su base una imagen simétrica e invertida al igual que como ocurre si se interpone un espejo. Nótese que esta inversión es producida en el ojo por el cristalino.

En su libro dedica sólo dos hojas a las lentes, explicando por qué éstas corrigen la presbicia y la miopía. Esto lo hace por presión de un personaje de su ciudad, el príncipe Dietrichstein. Este hecho es un ejemplo del poco interés que los científicos aún seguían teniendo por las lentes. De ahí en más las construcciones geométricas se desarrollaron sobre las bases dadas por Kepler y la regla de la triangulación

de la distancia pasó a ser un artificio de valor inestimable para la óptica geométrica.

En la primavera de 1609, fecha en que Ortega y Gasset ubica el nacimiento del hombre moderno y la rebelión de las ciencias mundanas frente al precedente imperio de la teología, Galileo prestó atención al catalejo. Consideró que podía ser un instrumento de valor para poder analizar las constelaciones estelares que en ese momento eran de su interés. Comenzó a perfeccionarlo, y por lo que él descubría y por el entusiasmo con que defendía el instrumento causó una revolución.

La intervención de Galileo se puede resumir en dos puntos. Con su nueva fe empírica, él demolió la terrible sentencia de la antigua filosofía: "no se puede hacer ciencia por medio de la vista". Con sus directivas dio inicio al perfeccionamiento de los instrumentos de observación destinados a potenciar la visión, mejorando su posibilidad de ver lo infinitamente grande y/o pequeño. Con la victoria clamorosa de la gran polémica de 1610 y luego con el aún más clamoroso proceso político, Galileo convirtió a la óptica en un campo de investigación de gran actualidad, rico en novedades, sorpresas y misterios.

Sin embargo, las doctrinas filosóficas seguían influyendo y había que demolerlas. Los nuevos ópticos no tenían todavía argumentos para ello. Entonces usaron el potente medio del olvido: no hablaron más del mundo aparente. La regla del triángulo de la distancia sirvió magníficamente para ello. Debido a que, en base a la propia regla de la triangulación la psiquis debía localizar un punto luminoso en el vértice del cono de rayos emergentes del sistema óptico, se podía llamar a dicho vértice "imagen" del punto objeto. En consecuencia, para estudiar las imágenes producidas por un sistema óptico, no era necesario hablar del ojo y mucho menos de la psiquis. (Ronchi 1968: xxix)

A partir de este momento, las imágenes adquirieron: 1) una existencia independiente del observador y 2) características físicas.

Esta increíble deformación filosófica todavía hoy domina en algunos sectores. El hecho es que,

sobre esta base se han llevado a cabo estudios importantes que retrasaron nuevamente el estudio de la visión.

Los cultores de esta nueva óptica, para evitar una revisión que hubiera sido demoledora, sepultaron a Kepler y con él a la regla del triángulo de la distancia. Es un fenómeno histórico y filosófico muy interesante: la óptica está toda fundada sobre esta regla y nadie la pone en evidencia. Que el ojo deba ver un punto luminoso en el vértice del cono de rayos que llegan a la pupila, es una verdad intuitiva que nadie discute. Pero en realidad esto no es cierto. (Ronchi 1968: xxx)

Después de Kepler, el concepto de la escuela árabe de que la visión fuera el resultado de un lumen capaz de impresionar la retina y hasta producir dolor y post imagen presentó un nuevo interés. Perdía significado la distinción entre el concepto de "rayos" y el de "emisión", y sobre todo ésta no tenía mucha razón de ser. Se pensó que el lumen era un "quid" que se propagaba a lo largo del rayo geométrico. Pero ¿qué era el quid? Así se volvió sobre el problema del lumen que fue tratado en dos obras: la *Dióptrica* de Descartes y la del jesuita Francisco María Grimaldi (1618-1663) titulada *Los aspectos matemáticos de la luz* (Grimaldi 1665). Estas obras discuten la hipótesis corpuscular y además, en la del padre Grimaldi, pueden consultarse los primeros experimentos de obtención del color por medio de prismas (Figura 1).

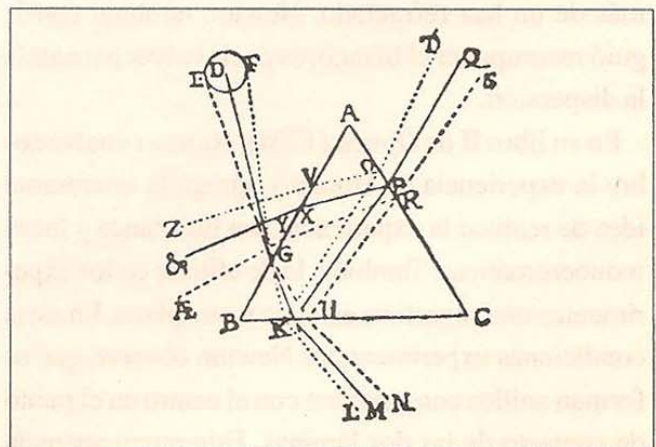


Figura 1: La refracción a través de un prisma de 60 grados. Dibujo extraído de *De lumine* del padre Grimaldi (1665: 257) (ver Ronchi 1983: 166).

También durante 1665 Robert Hooke (1635-1703) publica su *Micrografía*. Esta obra presentaba figuras vistas al microscopio y describía un fenómeno desconcertante: la coloración de láminas delgadas. En efecto, cuando se ponían casi en contacto dos láminas de vidrio transparente e incoloras se observaba sobre la superficie de contacto los colores del arco iris; la coloración desaparecía si las láminas se pegaban mucho o se separaban demasiado.

En este mismo año Newton (1642-1727) comienza sus estudios posiblemente inspirado por los trabajos de Grimaldi y Hooke. Newton se apasionó de sus argumentos y tuvo una idea genial: si el lumen fuese constituido por corpúsculos materiales éstos debían favorecer la ley de atracción entre cuerpos materiales, ley que para ese tiempo estaba mejor definida. En consecuencia, al pasar la luz del externo al interno de un cuerpo material los corpúsculos serían afectados por la atracción que el cuerpo ejercía sobre ellos y en consecuencia debían desviar su trayectoria. Un simple cálculo demostró que la desviación seguía la ley publicada por Descartes en la *Dióptrica* de 1638. La determinación de un mecanismo que explicará la refracción llevó a la fama al joven científico, tanto más porque él extrajo rápidamente una consecuencia muy interesante: admitiendo que los corpúsculos constituyeran el lumen, éstos tendrían masas diversas. Estas masas producirían distintas desviaciones cuando se acercaran a un mismo medio refringente donde no solamente se debía dar la refracción sino también la dispersión. En otras palabras, a un mismo haz incidente debía corresponder más de un haz refractado. Newton también consiguió recomponer el blanco, es decir volver para atrás la dispersión.

En su libro II de *Óptica* (1704), Newton vuelve sobre la experiencia de Hooke y agrega la interesante idea de realizar la experiencia con luz blanca y luces monocromáticas. También, la de utilizar en los experimentos una superficie esférica y otra plana. En estas condiciones experimentales Newton observó que se forman anillos concéntricos con el centro en el punto de contacto de las dos láminas. Este punto aparecía oscuro mientras que los anillos pasan del violeta al rojo, siendo ocho o nueve para la luz blanca y muchos más para la luz monocromática (Figura 2).

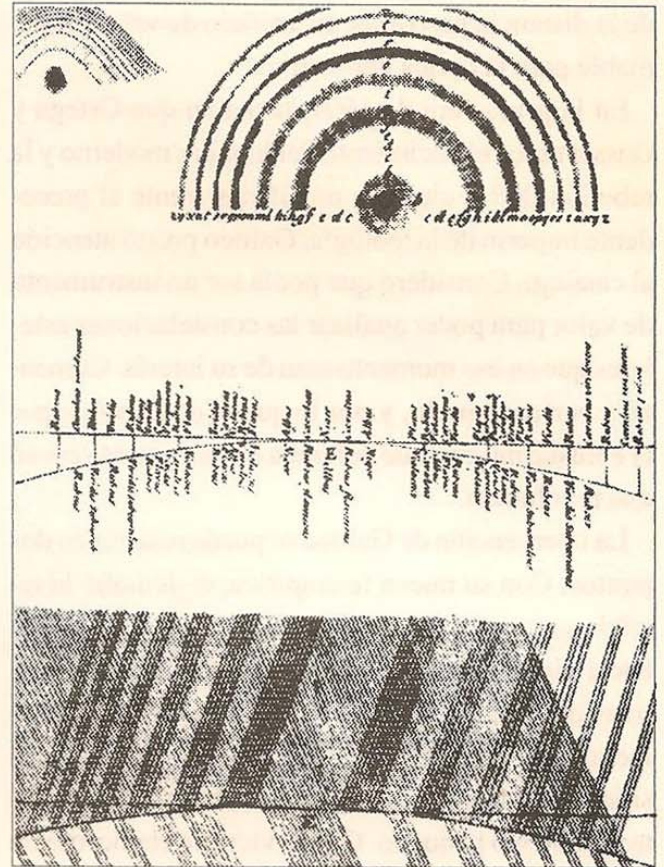


Figura 2: Dibujo extraído de la *Óptica* de Newton (1704), donde el autor representa y explica los "anillos" (ver Ronchi 1983: 198).

Analizando lo que ocurría con luz monocromática, Newton observó que se formaban anillos oscuros que separaban los grupos de anillos coloreados. Estos anillos se formaban donde el espesor de la lámina era múltiplo de un dado valor. También visualizó anillos claros donde el espesor tenía un valor intermedio entre dos anillos oscuros. Por último encontró los espesores necesarios para cada color.

Estas observaciones indicaban claramente una periodicidad en el comportamiento de la luz. Pero el andamiaje que Newton había construido para su trabajo no le permitía aceptar un modo de propagación de la luz digno de ser llamado difracción y por ello en su Definición III sólo dice: "Son rayos más o menos reflexibles, algunos se reflejan con mayor facilidad que otros". Nótese que igual fenómeno es descrito en el Libro III como "inflexión del rayo de luz".

Una nota interesante a propósito de la visión se encuentra en las Cuestiones XII y XIII. En ellas Newton se pregunta si no debería pensarse que los corpúsculos de lumen, golpeando el fondo de ojo (retina), producirían una vibración que se propagaría a



lo largo del nervio óptico llegando al cerebro y provocando las sensaciones visuales. Agrega que rayos de género diverso deben excitar vibraciones diversas y que estas diferencias darían lugar a la visión de los colores. Enseguida añade que las vibraciones relativas a rayos más refrangibles (violeta, 400 nm) deberían ser cortas y las relativas a rayos menos refrangibles (rojo, 700 nm) largas.

Recordemos que Newton también se ocupó de la doble refracción, fenómeno observado en 1669 por Erasmus Bartholini (1625-1698). Este naturalista sueco notó, en piedras calcáreas laminales, que cuando un haz de luz incide sobre los cristales de estas piedras, dicha luz se divide en dos haces, uno sigue la ley normal de la refracción mientras que el otro un camino no conocido o “una refracción extraordinaria” (Bartholini 1669).

Este fenómeno se correlacionó a otro anterior, aún más desconcertante: cuando un haz incidía en un conjunto de láminas transparentes, gran parte las atravesaba, pero otra parte se reflejaba en la primera y segunda capa de las láminas. Más tarde se supo que esto se debía a lo que hoy se denomina ángulo límite. Newton no pudo explicar estos fenómenos y atribuyó a “una propiedad congénita del rayo” la refracción extraordinaria.

Resumiendo, la idea que Newton tenía de la luz era que ella estaba compuesta de corpúsculos pequeños y veloces, que se propagaban rectilíneamente (rayos) en cualquier medio homogéneo y transparente sin producir ninguna modificación a la materia o a los rayos vecinos. Lo notable es que los muchos experimentos llevados a cabo por Newton clamaban por una teoría ondulatoria, que Newton se negó a admitir. También notable es que Newton, como el padre Grimaldi, no se pronunciara enfáticamente por la teoría corpuscular, quizás porque sentía que ella no se podía sostener. Conociendo bien el fenómeno de la interferencia, la difracción y la doble refracción, ambos sabían que la teoría corpuscular no alcanzaba para explicarlos. A Newton esto le fue señalado por sus contemporáneos, y no sólo por Huygens sino sobre todo por Hooke, que era sólo siete años mayor que Newton y en ese momento secretario de la Royal Society de Londres.

Resumiendo, hasta este momento el problema del lumen seguía interesando; la reflexión podía explicarse por una analogía mecánica con los cuerpos elásticos; ningún modelo mecánico podía explicar la refracción, que parecía un hecho rebelde.

Una minoría de científicos siguió investigando estos fenómenos y entre ellos debe destacarse al matemático francés Pierre Fermat (1601-1665). A él se debe un principio fundamental para la óptica que lleva su nombre. Él demostró —superando dificultades matemáticas no comunes para su tiempo— que el lumen recorre para pasar de un punto al otro el camino que requiere un tiempo mínimo. Él llega a esta conclusión admitiendo que la velocidad de propagación del lumen es tanto menor cuanto mayor es la densidad del medio.

También conviene recordar que ya desde un siglo antes, en los laboratorios donde se discutía la naturaleza del lumen, se había definido el principio de onda elemental, según el cual “cualquier punto de un medio al que llega una onda, se convierte en un nuevo centro de onda”.

Este principio fue precisado por Huygens (1629-1695) quien también precisó: “cuando una onda llega al orificio de un diafragma, el punto de orificio se convierte en un nuevo centro de onda elemental”. Después del orificio estas ondas se transmiten en todas direcciones, es decir, no se obtiene la propagación de la onda inicial sino una nueva onda.

Para afianzar estas conclusiones, los sostenedores de la teoría ondulatoria tropezaron con la teoría de las sombras que estaba bastante bien considerada y se valía de rayos de luz rectilíneos. Para salir de este problema Huygens (1690) agregó a su teoría de la onda elemental el concepto de onda eficaz. La onda eficaz era la suma de muchas ondas elementales y en consecuencia tenía un frente de onda potente (Figura 3). Nótese que el concepto de rayo por segunda vez volvía a ser teórico, pero el frente de onda comenzaba a ser una realidad. Hoy sabemos que cuando un frente de onda alcanza el ojo, esté o no presente el objeto que lo generó, el mismo se hará visible a nuestros ojos (fundamento de la holografía).

También Huygens explicó mecánicamente la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de las ondas, demostrando que se requería una veloci-

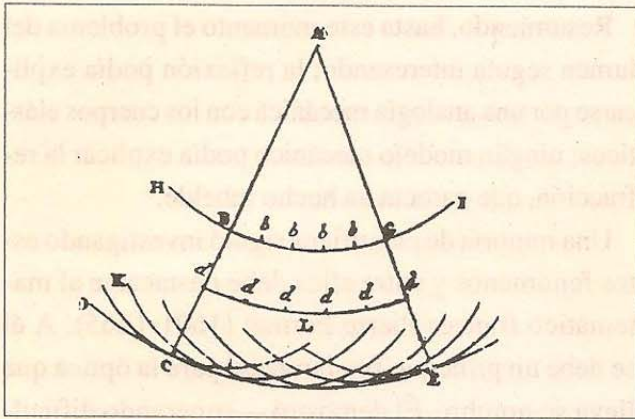


Figura 3: Esquema de Huygens que explica la envolvente de las ondas elementales. Dibujo extraído del *Tractatus de lumine* (1690) (ver Ronchi 1983: 226).

dad de propagación menor en el cuerpo más refringente. Finalmente también explicó la doble refracción. Es interesante notar que en los actuales cursos de física, estos razonamientos siguen enseñándose de igual modo.

Para ese tiempo, Ole Roemer (1644-1710) obtiene el valor de velocidad de la luz (lumen) analizando medidas astronómicas del eclipse de uno de los satélites de Júpiter. A partir de este momento hay que esperar al siglo XIX para obtener mayores resultados. Del *lux* no se habló más.

Para ese entonces el latín fue reemplazado por las lenguas vulgares. Del *lumen* y del *lux* se hizo una sola palabra que fue *luz* y que etimológicamente derivaba del *lux*. De la confusión filosófica que se hizo en aquel período surgió la idea de medir la luz con medios y métodos físicos, olvidando la intervención del ojo. Así nació una primera fotometría por obra de Pierre Bouguer (1698-1758), quien expone su fundamento en el famoso *Traité d'optique* (1760), publicado dos años después de su muerte.

Por mérito de esta obra Bouguer fue considerado en su tiempo el científico que después de Newton había obtenido mayores resultados en el estudio de las propiedades de la luz. Él puso en evidencia algunos puntos escabrosos como el de la "dimensión cero" que refería a la igualación que un observador realiza entre dos luces que considera iguales en intensidad. Este método de medición por igualación, donde el observador no valora ninguna diferencia residual, se utiliza hasta el día de hoy, y es también el adoptado por la colorimetría de principios de este siglo hasta la fecha.

Para Ronchi, la obra de Bouguer tienen un intere-

sante carácter filosófico. Dice al respecto:

durante el siglo XVIII se produjo una lenta y progresiva transformación que alejaba cada vez más la mente de los científicos de los esquemas del pasado, llenándola de preconcepciones falsas, pero sustentadas por evidencias indiscutibles. (Ronchi 1983: 248)

Así, el ambiente académico aceptó la teoría vertida en la obra de Bouguer sin mayor análisis, a pesar de que algunos la objetaban.

A comienzos del 1800, la idea que se tenía de la luz quedó establecida en la memoria de Etienne Malus (1775-1812), *Teoría de la doble refracción de la luz en las sustancias cristalinas* (1810), memoria que recibió un premio de la Academia de Francia en enero de 1810. En una parte del texto el autor dice:

Los fenómenos ópticos tienen la ventaja particular de poder ser medidos con gran precisión y estar regidos por un pequeño número de leyes matemáticas. Estas leyes son independientes de las hipótesis que puedan establecerse sobre la naturaleza de la luz; porque sea que se suponga con Newton que ella consiste en un fluido muy enrarecido que se emite por todas las partes de un cuerpo luminoso, o que se suponga con Huygens que la luz es producida por la ondulación de un fluido (éter), el camino de rayos es siempre el mismo. Yo adopto en esta obra la opinión de Newton, no como una verdad indiscutible sino como un medio para fijar ideas y para interpretar las operaciones de análisis. Es una simple hipótesis que por otra parte no tiene influencia sobre los resultados del cálculo. (Malus 1810: 255)

Como puede notarse, a pesar de ser Malus un seguidor de la teoría corpuscular, no parece ella despertar gran confianza. El problema era que las teorías de Huygens todavía eran difíciles de comprender y parecían incompatibles con fenómenos químicos producidos por la luz. La teoría de la emisión resultaba más creíble y concordaba mejor con los conocimientos físicos del momento y con teorías anteriores como la de sombras y perspectiva.

Para ese entonces un joven médico, Thomas Young (1773-1829), enunció uno de los principios fundamentales de la propagación de las ondas, que llamó principio de interferencia. Young (1801, 1802) demostró que muchos fenómenos ópticos que se habían dejado de lado eran fácilmente explicables admitiendo que las radiaciones eran ondas que podían interferirse. Young mide la frecuencia de las ondas y establece una correlación entre esa magnitud y los colores.

Pero, quien finalmente terminó por demoler definitivamente la teoría corpuscular de las radiaciones, fue Agustín Fresnel (1788-1827), un joven ingeniero francés que, confinado a un pequeño lugar por razones políticas, se dedicó al estudio de la difracción realizando cuidadosas mediciones mediante un micrómetro construido por el herrero de la zona. Fresnel consigue explicar con toda precisión los complicados fenómenos de la difracción, completando el

principio de Huygens en base a un conocimiento más acabado de la cinemática de las ondas. Él notó que no se podía hablar de interferencia de ondas como creía Huygens. Como había demostrado Young superponiendo dos ondas, observa que no siempre se obtiene sumas sino también diferencias debido a las diferencias de fases, y que estas diferencias podían también resultar cero, o en otras palabras cancelarse (Figura 4). Concluye que, por lo demostrado, convenía hablar de "integral" de ondas elementales.

Fresnel encontró estos integrales y además demostró que ellos estaban de acuerdo con resultados experimentales. Recordemos que la onda de Fresnel era considerada de naturaleza elástica y se suponía que se propagaba en un fluido misterioso, llamado éter, del cual nunca se definió sus características.

Fresnel publica sus ideas en una *Memoria* presentada a la Academia el 15 de julio de 1816 y en un concur-

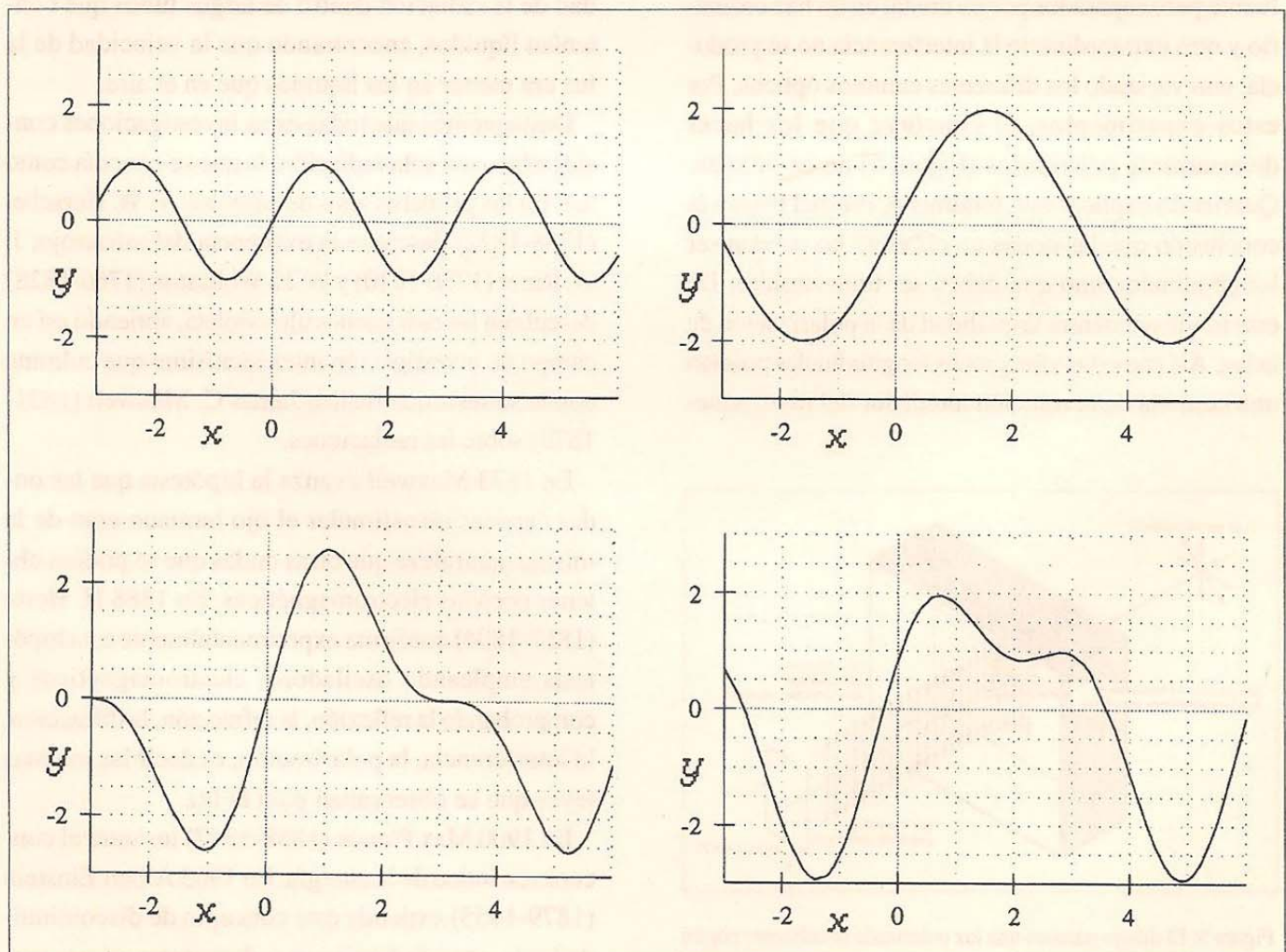


Figura 4: Esquema sobre composición de ondas. Arriba izquierda, función  $y = \sin(2x)$ ; derecha, función  $y = 2 \sin(x)$ . Abajo izquierda, función  $y = 2 \sin(x) + \sin(2x)$ ; derecha,  $y = 2 \sin(x) + \sin(2x + 1)$ .

so —con premio— que instituyó la Academia el 20 de abril de 1818 sobre el tema. Dicho concurso fue ganado por Fresnel en 1819, y por lo importante del trabajo esta fecha indica el fin de las ideas newtonianas.

Hay que destacar que Fresnel tenía un gran dominio de los mecanismos ondulatorios y del comportamiento de las ondas en los fenómenos de interferencia. Por ello, él se dio cuenta claramente que para que dos ondas interfirieran debían cumplir ciertos requisitos. Éstos hoy se resumen como: de homogeneidad y coherencia, igualdad espectral (igual longitud de onda) y constancia de diferencia de fase. También Fresnel indicó que en la práctica, para obtener interferencia, debía trabajarse con una única fuente luminosa dividiendo el haz de rayos en dos con caminos ópticos diferentes.

Cuando Fresnel, siguiendo sus estudios, comenzó a experimentar con sustancias birrefringentes, constató que superponiendo haces emitidos por una misma fuente pero separados por un cristal en un haz ordinario y otro extraordinario la interferencia no se producía, aun variando los diferentes caminos ópticos. Por estos experimentos, él concluye que los haces diversamente polarizados (Figura 5) no se influían. Queriendo explicar este fenómeno, Fresnel llega a la conclusión que las ondas en el “éter” no pueden ser longitudinales sino que deben ser transversales. De este modo encuentra la cualidad de la polarización de la luz. Así como las vibraciones longitudinales poseían una simetría de revolución alrededor del rayo, aque-

llas transversales poseían en vez una simetría con respecto a dos planos ortogonales pasantes por el rayo: el de la vibración y el perpendicular. Bastaba imaginar que el haz ordinario y el extraordinario fueran polarizados en dos planos perpendiculares para que la teoría y la práctica concordaran.

Esta concepción de la onda transversal encontró una gran resistencia en el ambiente científico, ya que no se podía concebir un éter fluidísimo y sutil que poseyese al mismo tiempo las propiedades mecánicas de un sólido rígido. Así se llega al siglo XIX, que constituye el período áureo de la teoría ondulatoria de las radiaciones.

León Foucault (1819-1868) y después Hipólito Fizeau (1819-1896) siguen realizando mediciones sobre la velocidad de las radiaciones en el ámbito terrestre, primero con el método de la rueda dentada y luego en laboratorio con el método del espejo rotante. En estas condiciones les fue posible medir la velocidad de la radiación dentro de largos tubos que contenían líquidos, encontrando que la velocidad de la luz era menor en los líquidos que en el aire.

Destaquemos que todas estas investigaciones consideraban una sola radiación, la que se conocía como luz. En los primeros años del siglo XIX, F. W. Herschel (1738-1822) descubre la existencia del infrarrojo, J. W. Ritter (1776-1810) y W. H. Wollaston (1766-1828) descubren las radiaciones ultravioleta, abriendo así un campo de investigación interesantísimo que culmina con la síntesis que realiza James C. Maxwell (1831-1879) sobre las radiaciones.

En 1873 Maxwell avanza la hipótesis que las ondas capaces de estimular el ojo humano eran de la misma naturaleza que otras ondas que se podían obtener por vías electromagnéticas. En 1888 H. Hertz (1857-1894) confirma experimentalmente esta hipótesis empleando osciladores electromagnéticos y comprobando la reflexión, la refracción, la difracción, la interferencia, la polarización, es decir las mismas leyes que se observaban para la luz.

En 1900 Max Planck (1858-1947) instaura el concepto cuántico de la energía. En 1905 Albert Einstein (1879-1955) extiende este concepto de discontinuidad a la energía luminosa y demuestra cómo, mediante el modelo de “cuanta de luz” (que N. G. Lewis en 1926 llamó fotones) puede explicarse un conspi-

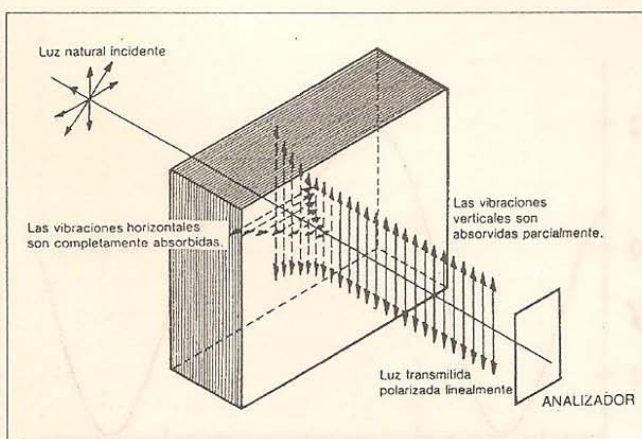


Figura 5: El dibujo muestra una luz polarizada linealmente por un cristal dicróico. A representa un segundo cristal o filtro polarizador que permite variar la intensidad de la luz además de comprobar su polarización (adaptado de Sears y Zemansky 1957: 901).

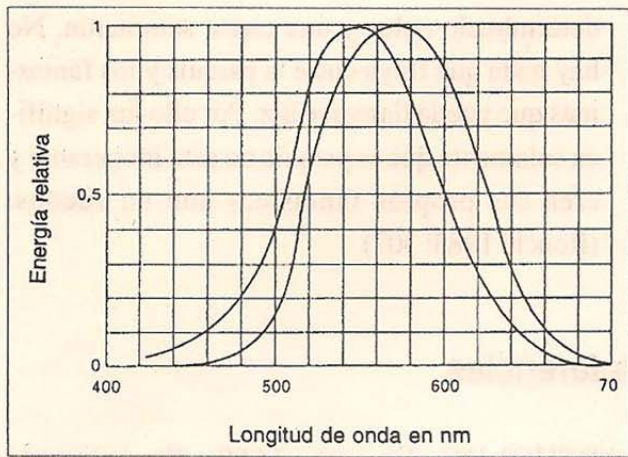


Figura 6: Sensibilidad visual del ojo humano para niveles fotópicos (curva de la derecha) y escotópicos (curva de la izquierda). Las curvas representan el promedio de 125 observadores (adaptado de Boff, Kaufman y Thomas 1986: 5-8).

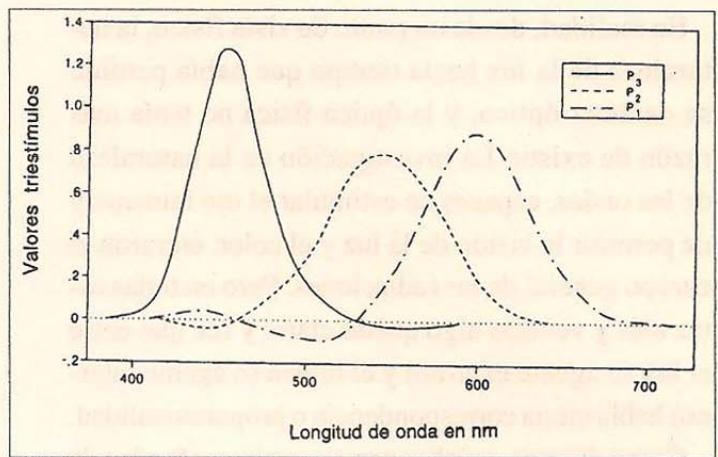


Figura 7: Valores triestímulos para un espectro de igual energía, empleando los primarios: 650 (P1), 530 (P2) y 460 (P3) (adaptado de Wright 1946: 130).

cuo grupo de fenómenos que con el modelo ondulatorio clásico no se podía.

Mientras tanto, la medición de la luz continuó realizándose como lo había planteado Bouguer. A Ronchi le llama la atención que esto suceda después de tantos nuevos descubrimientos y dice:

Es notable la fe y la tenacidad demostrada por los que se dedicaron a este trabajo; y es aún más notable su comportamiento porque constituye un ejemplo admirable de la potencia de los preconceptos aun en la búsqueda experimental que debería ser "objetiva" e "impersonal".

Es evidente que el propósito de medir la luz debió surgir de alguien que creyese que era una entidad mensurable olvidando que para ser mensurable debía ser objetiva y externa al observador. (Ronchi 1983: 289)

Sin embargo, desde el tiempo de Bouguer se emplea el ojo humano y el método de igualación. Es interesante hacer notar que este método psicofísico fue el único aceptado por los físicos para trabajar en colorimetría, porque en el fondo ellos sabían que otros métodos psicofísicos presentaban aún mayores desviaciones estándar difíciles de ser admitidas por un físico. Esta metodología acarreó otros problemas: determinar un ojo u observador patrón y un blanco patrón. Para resolver este problema hubo que realizar numerosas mediciones, contándose a la fecha con dos

observadores patrones, como indican las Figuras 6 y 7, y diferentes blancos patrones (Figura 8).

A esta altura, los fotometristas dejaron las anomalías visuales en mano de los fisiólogos y psicólogos y se conformaron con contar con un ojo patrón. No puede dejar de verse en toda esta historia una gran habilidad para sortear obstáculos a fin de llegar a una fotometría y colorimetría aceptables, ¡tan aceptables que el común de las personas cree que se trata de mediciones físicas!

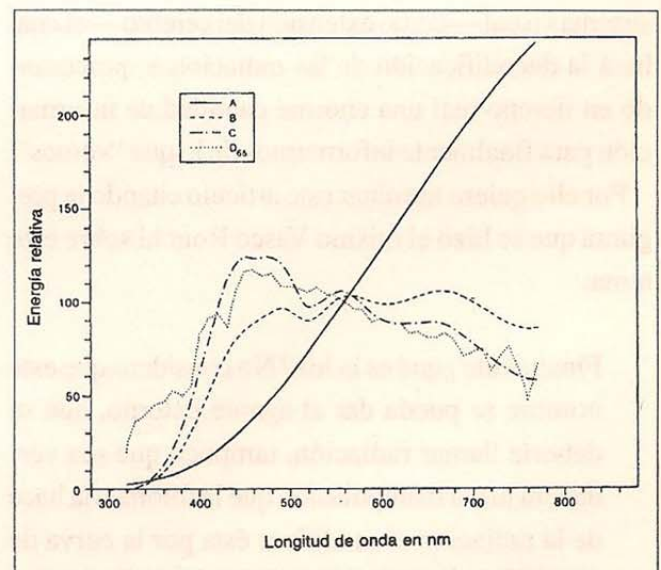


Figura 8: Distribución espectral de energía relativa de fuentes patrones adoptadas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). El iluminante A corresponde a una lámpara incandescente de 2854 °K; el B a luz directa del sol a 4874 °K; el C a la luz de un cielo semicubierto a 6774 °K; el D65 a una luz de día con 6504 °K (adaptado de Boff, Kaufman y Thomas 1986: 5-8).

En realidad, desde un punto de vista físico, la naturaleza de la luz hacía tiempo que había perdido su carácter óptico, y la óptica física no tenía más razón de existir. La investigación de la naturaleza de las ondas, capaces de estimular el ojo humano y de permitir la visión de la luz y el color, entraron al cuerpo general de las radiaciones. Pero en todas estas idas y venidas algo quedó claro, y fue que entre el lux (o agente externo) y el lumen (o agente interno) había cierta correspondencia o proporcionalidad.

Como dijimos, muchas personas aún confunden de esta historia lo que es realmente físico de lo psíquico. En un momento de esta historia la atención se centró en el lumen y el lux se olvidó. Cuando el latín dejó de cumplir su función como lengua científica, las lenguas modernas acuñaron una sola palabra para el lumen y el lux. Así en todas las lenguas nos referimos sólo a la luz, *luce*, *lumière*, *light*, *licht* y nos olvidamos del agente interno que quedó en mano de los fisiólogos.

La última pregunta sería: ¿es correcto llamar luz a la manipulación que hace de ella la fotometría? Igual pregunta podría hacerse a la colorimetría: ¿es color lo que ella mide? Si pensamos en el lux tenemos que aceptar que de nuestro mundo externo sólo nos llegan múltiples radiaciones que es necesario decodificar para que adquieran sentido perceptivo. Si pensamos en el lumen debemos obligatoriamente referirnos al sistema visual —como extensión del cerebro— el cual hará la decodificación de las radiaciones, procesando en tiempo real una enorme cantidad de información para finalmente informarnos de lo que “vemos”.

Por ello quiero terminar este artículo citando la pregunta que se hizo el mismo Vasco Ronchi sobre este tema:

Finalmente ¿qué es la luz? No considero que este nombre se pueda dar al agente externo, que se debería llamar radiación, tampoco que sea verdadera luz la manipulación que la fotometría hace de la radiación al modificar ésta por la curva de sensibilidad del ojo. Quizás por ello sólo se puede hablar de fantasmas<sup>2</sup> dotados de brillo, de un

2. El término está usado en la acepción dada por la psiquiatría de la década del sesenta. Fantasmas: imágenes de la fantasía, imágenes psíquicas subjetivas que se distinguen de las

determinado color y una cierta saturación. No hay nada que fluya entre la psiquis y los fantasmas que pueda llamarse luz. Por ello luz significa solamente que la psiquis no está inoperante y crea sus propios fantasmas aun en sueños. (Ronchi 1983: 307)

## Referencias

- BARTHOLINI, Erasmo. 1669. *Experimenta crystalli islandia disdiaclastici quibus mira et insolita refractio detegitur* (Copenhague).
- BOFF, K., KAUFMAN, L. y THOMAS, J. eds. 1986. *Handbook of perception and human performance*, vol. 1, *Sensory processes and perception* (Nueva York: John Wiley & Sons).
- DE MIGUEL, Raimundo. 1908. *Diccionario latino-español* (Madrid).
- ECK, M. 1966. *Los enfermos mentales y su tratamiento* (Barcelona: Herder).
- GRIMALDI, Francisco Maria. 1665. *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride* (Bolonia).
- HOOKE, Robert. 1665. *Micrographia* (Londres).
- HUYGENS, Christian. 1690. *Tractatus de lumine*, en *Opera reliquia*, ed. Gravesande, vol. I (Amsterdam: Waesberg, 1728).
- MALUS, Etienne L. 1810. *Théorie de la double refraction de la lumière dans les substances cristallisees* (París).
- NEWTON, Isaac. 1704. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light* (Nueva York: Dover, 1952, basada en la 4ta ed., Londres, 1730).
- ORTEGA Y GASSET, José. 1947. “En torno a Galileo”, *Revista de Occidente*.
- RONCHI, Vasco. 1968. *Scritti di ottica* (Milán: Edizioni il Polifilo).
- . 1983. *Storia de la luce. Da Euclide a Einstein* (Bari: Laterza).

alucinaciones porque en estas últimas el sujeto cree que se trata de realidades objetivas, existentes en el mundo exterior, mientras que en las primeras sabe que son producto de la fantasía (Eck, 1966: 291).

SEARS, F., y ZEMANSKY, M. 1954. *University physics*, 2da ed. (Cambridge Massachusetts: Addison Wesley). Traducción española por Albino Yusta Almarza, *Física general* (Madrid: Aguilar 1957).

WRIGHT, William David. 1946. *Researches on normal and defective colour vision* (Londres: Henry Kimpton).

YOUNG, Thomas. 1801. "On the theory of light and colours", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1802, 12-48.

———. 1802. "An account of some cases of the production of colours, not hitherto described", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 387-397.

Recibido: 31 octubre 1995; aceptado: 20 marzo 1996

*María L. Fago de Mattiello, graduada en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Buenos Aires en 1959, comienza su carrera docente en 1956 dentro del Departamento de Visión de dicha Facultad. Obtiene por concurso el cargo de Profesora Titular en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de La*

*Plata en 1970 y luego en la de la Universidad de Buenos Aires, donde actualmente es profesora de Dibujo (dentro del Ciclo Básico Común) y de Sistemas de Representación Geométrica y Morfología. Su formación científica se inicia con una beca de la Universidad de Buenos Aires (1963) y otra del Fondo Nacional de las Artes (1964). Luego pasa a ser becaria del CONICET de 1966 a 1972, e ingresa a la Carrera del Investigador Científico con el grado de Independiente. Actualmente reviste en el CONICET como Investigador Principal, siendo su área de trabajo la psicofísica visual. Tiene más de cien publicaciones en revistas nacionales y extranjeras y tres libros: Dibujo, una introducción general para las carreras de diseño de la FADU (UBA, CBC, 1995), Lecciones de óptica fisiológica (en corrección), e Informe sobre 10 años de actividad de la División 6 de la CIE. Fotobiología y Fotoquímica. Es presidente del Comité Luminotécnico Argentino, vicepresidente de la Asociación Argentina de Luminotecnia, socio honorario del Grupo Argentino del Color y miembro de otras sociedades científicas. Actualmente dirige el Laboratorio de Investigaciones Visuales (LIVIS) del CONICET.*