

## MODELOS DE VISIÓN EN LA ANTIGUA GRECIA

Encontramos las primeras propuestas elaboradas sobre el tema de la visión en la antigua Grecia. En el siglo VI a. de C. Pitágoras (582 a. de C. - 507 a de C.) planteó que la luz emanaba del ojo en forma de rayos luminosos que se propagan en línea recta formando conos con el vértice de éste. Supuso que esta emanación chocaba con los cuerpos y la visión era el resultado de este choque. Medio siglo después, Empédocles (495 a. de C - 435 a. de C) consideró a la luz constituida por efluvios que eran proyectados por las fuentes incandescentes, los ojos y los cuerpos visibles. Y, medio siglo más tarde Platón (427 a. de C - 347 a. de C.) planteó que mientras nuestros ojos emitían pequeñas partículas de luz, del objeto también emanaba una sutil capa o un efluvio (la "eidola") y que era el contacto entre el fuego visual emitido por el ojo y este efluvio lo que producía la sensación de la visión.

Existe una analogía entre estas primeras propuestas sobre la visión y el sentido del tacto. Del mismo modo que cuando tocamos un objeto tenemos sensaciones que nos permiten interpretar propiedades como su rugosidad o su temperatura, estos modelos de la visión consideraron que cuando la luz enviada por nuestros ojos interaccionaba con el objeto, percibíamos su imagen. Con los atomistas (Demócrito, Leucipo, Epicuro..) se planteó una teoría de la visión algo más elaborada, que debía encajar en un marco de pensamiento para el que la percepción sensorial requería contacto físico. Demócrito (460 a. de C. 360 a. de C.) planteó que de los objetos emanaba una sutil capa de átomos que forman un simulacro del objeto (equivalente a la eidola o imagen del mismo) y consideró que esos átomos "vuelan" hasta los órganos de la vista para provocar la visión.

La analogía en este caso se puede establecer con el sentido del olfato, puesto que, según esta propuesta los átomos de la visión fijaban la imagen en los ojos del mismo modo que otros átomos impresionan el olfato. Demócrito supuso además que los cuerpos emitían átomos de distintas formas y tamaños que portaban diferentes aspectos de su imagen.

Algunas de las incongruencias de estas primeras concepciones de la imagen óptica fueron expresadas un siglo después por Aristóteles (384 a. de C. - 322 a. de C.) y por otros filósofos griegos. Así, por ejemplo, se plantearon cuestiones del tipo: Si los objetos emiten imágenes, ¿qué ocurre cuando éstas se cruzan en el aire?, ¿cómo puede caber la imagen de un gran objeto en la pupila del ojo? Si la imagen desprendida es la causa de la visión, ¿por qué sólo ve el ojo y no las otras partes del cuerpo a donde llega? Para Aristóteles la luz era una cualidad que hace posible la visión y no una emanación de ningún cuerpo, pero sus explicaciones imprecisas y oscuras no permitieron superar las carencias de las ideas precedentes.

## MODELO DE VISIÓN DE ALHACEN

En el siglo XI Ibn al-Haytam, conocido en occidente como Alhazen (965-1039) propuso un modelo de luz y de visión que superó bastantes de las dificultades que habían planteado los modelos de la antigüedad. Basándose en el hecho de que el color con que se ven los objetos está en consonancia con la luz que los ilumina, pensó que la luz debía intervenir en la visión, más precisamente que debía ser considerada como una entidad independiente del objeto y del ojo que hace de intermediario en la visión.

Alhazen realizó numerosas e importantes contribuciones en matemáticas, anatomía, medicina, astronomía y física. Escribió un "Libro de óptica" (1021) considerado uno de los libros más influyentes en la historia de la física. Por primera vez utilizó procedimientos del método científico para demostrar la propagación rectilínea de la luz. Estudió la reflexión, la refracción y la dispersión en colores, y realizó varios experimentos con dioptrios y espejos.

Fue el primero en dar una interpretación clara del funcionamiento de la cámara oscura y planteó un modelo de visión según el cual ésta consistía en la formación de una imagen óptica en el interior del ojo que funcionaba de forma semejante a su modelo de cámara oscura. Supuso que uno de los rayos de luz emitidos por cada punto del objeto iluminado atravesaba el pequeño agujero de la pupila y formaba el punto correspondiente de la imagen en una pantalla interior de esa "cámara".

Con esta propuesta Alhazen había modelizado al ojo humano como un instrumento óptico, ayudando a que la ciencia de la visión empezara a ser una ciencia de la luz. La luz pasó a ser considerada como una entidad física en el espacio independiente del ojo del observador y de la fuente luminosa y que, por tanto, podía ser objeto de estudio en sí misma independientemente de la visión.

Esta concepción de la visión y de la imagen óptica de Alhazen se sustentó en varios conceptos novedosos. Uno de los más importantes fue considerar expresamente a los objetos que vemos como fuentes secundarias de luz e idealizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales que emiten rayos en todas las direcciones. Las fuentes de luz propia, como una estrella o una bombilla, emiten luz en todas las direcciones y son vistas cuando algunos de los rayos emitidos llegan al ojo. Puesto que podemos ver objetos (como, por ejemplo, una mesa o un lápiz) que no emiten luz propia, se han de considerar estos objetos como fuentes secundarias de luz.

En sus estudios, Alhazen consideró los rayos de luz como trazos rectos de cuyo comportamiento geométrico se pueden derivar consecuencias ópticas. Al estudiar la reflexión y la refracción fue el primero en descomponer los rayos en componentes horizontal y vertical e incluso encontró un resultado similar a la ley de Snell de la refracción, aunque no lo expresó matemáticamente. Estos avances le permitieron

explicar varios fenómenos de visión indirecta como cuando vemos un objeto al mirar a un espejo plano o cuando se encuentra sumergido en el agua.

El modelo de visión de Alhazen superó muchas carencias anteriores, pero erró al considerar que la formación de cada punto de la imagen óptica se realizaba con un único rayo procedente de cada punto del objeto. En realidad, esta suposición es incompatible con las observaciones de la cámara oscura (resulta curioso que, pese a su éxito inicial, la teoría de Alhazen no pudiera explicar precisamente algunas observaciones con la cámara oscura, cada vez más utilizada en la Edad Media) y con el comportamiento de las lentes (desconocidas en su época).

### **MODELO DE VISIÓN DE KEPLER**

En 1604 Kepler (1571-1630) publicó el libro *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur* que estaba dividido en once capítulos, los cinco primeros dedicados a cuestiones de óptica y los restantes a temas de astronomía. Aunque Kepler es mucho más reconocido por sus aportaciones en astronomía, también hizo contribuciones muy importantes en óptica: Enunció una primera aproximación satisfactoria de la ley de la refracción, distinguió claramente entre los problemas físicos de la visión y sus aspectos fisiológicos, y analizó cuidadosamente el aspecto geométrico de diversos sistemas ópticos.

Kepler conocía un antiguo problema, que ya había planteado Aristóteles y al que no se había dado solución: ¿por qué los rayos de Sol percibidos durante un eclipse a través de los dedos entrecruzados o entre las hojas de los árboles dibujan lúnulas sobre el suelo?. Las lúnulas son imágenes de la Luna que se producen cuando la luz solar atraviesa pequeñas rendija que dejan las hojas o nuestros dedos. El proceso de formación de estas imágenes es similar al que forma imágenes en una cámara oscura. Trasladado a ella el problema, nos deberíamos preguntar por qué la forma del agujero por donde entra la luz no influye en la forma de la imagen del objeto que se ve en la pantalla. La teoría de Alhazen no resolvía esta cuestión.

El problema fue muy evidente durante un eclipse de Sol que tuvo lugar en el año 1600. Kepler observó que el diámetro del disco lunar medido en una cámara oscura durante el eclipse era ¡menor que cuando se medía el mismo diámetro en fase de Luna llena! El astrónomo Tycho Brahe (1546-1601), también se había apercebido del hecho y ante las dificultades de encontrar una explicación óptica, llegó a formular una hipótesis de dilatación periódica de la Luna. Porque, si tal como planteaba el modelo de Alhazen, en la cámara oscura entrara para formar la imagen un único rayo procedente desde cada punto del disco solar, no se podría justificar la variación del diámetro lunar que se observa en la pantalla de este dispositivo.

Para afrontar estas dificultades Kepler planteó un nuevo modelo de formación de imágenes. El primer aspecto novedoso de su propuesta fue considerar a la luz emitida por cada punto del objeto como una esfera en expansión y a los rayos solamente como elementos direccionales ideales, sin entidad real. Escribió: El rayo de luz no es nada de la misma luz que marcha.

De acuerdo con la propuesta de Kepler, cuando una parte del haz esférico emitido por la fuente puntual entra en el orificio de la cámara oscura, se selecciona un haz divergente de luz y se obtiene en la pantalla una mancha luminosa con la misma forma de la hendidura, por ejemplo triangular. Como, para una fuente luminosa extensa y lejana, se trazan multitud de haces divergentes desde cada uno de sus puntos, la superposición de las pequeñas manchas triangulares compone en la pantalla una réplica de la fuente luminosa, es decir, una figura que tiene la misma forma que ella.

Además de explicar la obtención de réplicas de las fuentes luminosas que se observan en la cámara oscura, la hipótesis geométrica que planteó Kepler sobre la propagación de la luz también resuelve el problema de la dilatación del disco lunar que se observa en dicha cámara durante el eclipse solar.

Un segundo aspecto esencial de la teoría de Kepler sobre la luz y la visión se refiere al proceso de formación de imágenes, que sustentó en conocimientos acumulados en su época sobre la fisiología del ojo y sobre el funcionamiento de las lentes.

Respecto a la fisiología ocular, Leonardo Da Vinci (1452-1519) había supuesto un siglo antes que la formación de la imagen visual debía de formarse en la retina, aunque el hecho de que la imagen sobre ésta es invertida le debió de parecer inaceptable y dibujaba los ojos de forma que los rayos luminosos se cortaban en su interior dos veces. Casi un siglo después, en 1583 un anatomista suizo llamado Platter (1536-1614) realizó un experimento que probó que la retina era exactamente la sede de la foto-recepción. Hasta entonces, a pesar de la propuesta de Leonardo Da Vinci, muchos pensaban que esta función la realizaba el cristalino. Platter cortó los ligamentos del cristalino y comprobó que la visión no desaparecía.

En cuanto a los estudios sobre el funcionamiento de las lentes y su relación con la visión humana, se atribuye también a Leonardo da Vinci la primera descripción de un dispositivo que podría asimilarse a una lente de contacto y el mérito de haber sido el primero que planteó la posibilidad de usarla para corregir problemas visuales. Posteriormente, durante los siglos XVI y XVII se inventaron varios instrumentos que usaban lentes para propiciar o mejorar la visión de objetos muy pequeños o muy alejados (entre ellos el telescopio y el microscopio). Por su parte, Galileo, contemporáneo de Kepler, hizo en 1609 importantes aportes teóricos y prácticos sobre

el funcionamiento de las lentes, que el mismo aplicó a la construcción de gemelos y el perfeccionamiento del anteojo astronómico.

En este contexto, Kepler consideró al ojo humano como una cavidad oscura esférica y acuosa con una lente de convergencia variable (el cristalino) en su interior. Lo modelizó como un sistema óptico formado por una lente convergente (el cristalino) y una pantalla (la retina). Según su propuesta, la visión se produce con la formación de una imagen del objeto en la retina. Para formar dicha imagen, cada haz de luz esférico y divergente que entra en la pupila converge en un punto de la misma, siendo la imagen extensa de un objeto la colección de todos los puntos imagen.

El objeto, por tanto, es considerado como un conjunto de fuentes puntuales de diferentes tipos de luz y la imagen como la colección de esas mismas fuentes de luz, sólo que con menores intensidades. Según Kepler, las características de esta imagen (color, posición, distancia, tamaño) no se pueden explicar más que por referencia al ojo, y por eso reconocemos el objeto al mirar su imagen en una pantalla.

Este concepto de imagen óptica también explica los fenómenos de visión indirecta cuando se mira a un espejo o a un objeto sumergido en el agua. Igual que en la visión directa, en la visión indirecta un haz de luz divergente emitido por cada punto del objeto entra en el ojo para converger en la imagen de la retina. El ojo localiza la posición de lo que ve en el vértice del cono divergente u origen geométrico del haz de luz que llega al ojo (lo que llamamos la imagen virtual de  $O$ ,  $O'$ ). Para encontrar el punto observado  $O'$  no es necesario trazar una "línea de imagen" de  $O$  a  $O'$  (como se necesitaba hacer usando el modelo de Alhacen). Solo hay que prolongar hacia atrás el cono de luz divergente que llega al ojo.

Otra contribución del modelo de visión de Kepler fue aclarar la diferencia entre lo que es una imagen óptica, como la formada usando una lente convergente o nuestros ojos, y lo que hemos llamado una réplica, como la que se obtiene usando una cámara oscura.

Tal como se explica en la página anterior, en la pantalla de una cámara oscura se obtiene una réplica del objeto que se conforma sumando múltiples imágenes del orificio. Por eso, si dicho orificio es suficientemente pequeño, al alejar o acercar la pantalla se sigue viendo, prácticamente sin alteraciones, la misma réplica.

En cambio, cuando se usa una lente convergente, ésta desvía la luz procedente del objeto, haciendo converger el haz esférico procedente de cada punto del mismo a una determinada distancia. Para ver la imagen nítida, la pantalla se ha de situar exactamente a esa distancia. Si se aleja o se acerca la imagen se deja de ver.

El hecho de que no podamos distinguir si la figura que vemos en una pantalla es una imagen óptica formada con una lente convergente o es una réplica formada con

una cámara oscura de agujero pequeño, se debe a las limitaciones del poder de resolución del ojo humano. En las mejores condiciones de contraste luminoso no se pueden distinguir separados dos puntos cuya distancia subtienda con el ojo un ángulo menor de  $1'$  de arco. Si la mancha luminosa producida en la pantalla de la cámara oscura por el haz divergente que deja pasar el agujero es suficientemente pequeña, la luz difundida desde cualquier punto de dicha mancha llega a nuestro ojo y converge en la retina en un área menor que esta superficie, por lo que es interpretada como si proviniera de un solo punto.

Por otra parte, puesto que la imagen que forma una lente convergente se produce a una determinada distancia de ella y esta distancia de enfoque depende a su vez de la distancia a la que se encuentre el objeto visto, la lente del ojo (el cristalino) es flexible en el modelo de Kepler. Cuando el objeto visto se encuentra a mucha distancia el ojo está relajado, el cristalino tiene poca convexidad y la imagen se forma en la retina.

Si al acercar el objeto el ojo no cambiase en nada, la imagen se formaría detrás de la retina, y no se produciría la visión o (si el desplazamiento de la imagen no es excesivo) la visión sería borrosa. Según Kepler, al mirar un objeto próximo el cristalino se abomba (aumenta su convexidad) y así se consigue que la imagen se sitúe de nuevo en la retina y sea la visión nítida. Este procedimiento que sigue el ojo para enfocar los objetos se llama acomodación.

Para terminar esta descripción del modelo de Kepler es importante saber que él asignó el término imagen a la que supuestamente se obtiene en la retina del ojo y pintura a la figura que se puede ver en una pantalla gracias a un sistema convergente. Históricamente esta distinción se ha perdido. Descartes (1596- 1650), en 1637, y Newton (1643-1727), en 1704, plantearon que, dado que el modelo de ojo es similar a un sistema óptico convergente formado por una lente delgada y una pantalla, a la representación que vemos en ella también se la debe denominar imagen, por imitación a la que se forma (supuestamente) en la retina del ojo. Ahora bien, la imagen que vemos en la pantalla de un sistema convergente sólo existe cuando es interpretada por el cerebro del observador. En ausencia de un observador, sólo podemos decir que en esa pantalla existe una distribución de tipos de luz con diferentes intensidades, similar a la emitida por la fuente luminosa. Esa reproducción del patrón de luz emitido por el objeto que vemos en la pantalla no es una especie de objeto plano pegado en ella, como una fotografía, que existiría allí aunque no la miráramos. Como veremos, tampoco en la retina se forma una imagen acabada, como la que se obtiene con una cámara fotográfica.